

## Resumen

El acero inoxidable 2205 contiene cantidades iguales de austenita  $\gamma$  y ferrita  $\alpha$ . Esta microestructura le da buena resistencia a la corrosión, mientras que sus propiedades mecánicas son intermedias entre las de los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos, debido a la presencia de las dos fases.

Sin embargo, una característica de los aceros dúplex poco investigada es su resistencia al desgaste. En este proyecto se estudia el comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205. Para ello, se ha realizado su caracterización metalográfica y se han evaluado las características necesarias para complementar dicho estudio como la dureza, la densidad y la rugosidad superficial. A continuación, se han llevado a cabo los ensayos de tribología mediante la técnica de *"pin-on-disk"*. Esta técnica consiste en deslizar un pin sobre un disco a una cierta velocidad de deslizamiento durante una distancia determinada. Las velocidades de deslizamiento seleccionadas han sido: 0,2 m/s, 0,7 m/s y 1,2 m/s. Para cada una de estas velocidades, se han evaluado las distancias de: 500 m, 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m y 5000 m. A partir de estos ensayos, se ha determinado la cinética del desgaste, y los tipos y mecanismos de desgaste en deslizamiento del acero inoxidable 2205.

Los resultados obtenidos muestran que la cinética de desgaste depende de la velocidad de deslizamiento. Los tipos y mecanismos de desgaste dominantes evolucionan en función de la velocidad de deslizamiento y la distancia recorrida, existiendo una zona de transición en la que disminuye la cinética de desgaste.





# Índice

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
1.1. Composición química de los aceros inoxidables .....	5
1.2. Estructura de los aceros inoxidables .....	6
1.3. Normas de designación de los aceros inoxidables.....	8
1.4. Clasificación de los grados de aceros inoxidables .....	9
1.5. Propiedades de los aceros inoxidables .....	14
1.5.1. Resistencia a la corrosión.....	14
1.5.2. Propiedades.....	15
1.6. La tribología.....	17
1.6.1 Fricción .....	18
1.6.2 Desgaste.....	21
1.7 Estado del arte de la tribología en los aceros inoxidables.....	34
1.8 Objetivos del proyecto.....	36
<b>2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>37</b>
2.1. Materiales.....	37
2.2. Caracterización metalográfica del acero dúplex 2205.....	38
2.3. Medición de la dureza .....	41
2.4. Medición de la densidad .....	44
2.5. Medición de la rugosidad superficial.....	45
2.6. Ensayos de “pin-on-disk” .....	47
2.7. Análisis de superficie mediante microscopia .....	49
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>52</b>
3.1. Caracterización metalográfica del acero inoxidable Dúplex 2205.....	52
3.2. Dureza del acero inoxidable dúplex 2205.....	53
3.3. Densidad del acero inoxidable dúplex 2205 .....	54
3.4. Rugosidad superficial de los discos de acero inoxidable dúplex 2205 .....	54
3.5. Comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205 .....	56
3.5.1. Cinética del desgaste .....	56
3.5.2. Evolución de la fricción y de la temperatura .....	59



3.5.3. Mecanismos de desgaste y análisis de la superficie desgastada.....	68
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	<b>81</b>
<b>5. AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>83</b>
<b>6. COSTES E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL</b> .....	<b>84</b>
6.1. Costes.....	84
6.2. Impacto medioambiental .....	86
<b>7. REFERENCIAS</b> .....	<b>88</b>



# 1. Introducción

Los aceros inoxidables, en especial los aceros austeníticos, son utilizados en muchas aplicaciones tales como los reactores nucleares así como en la industria química y alimentaria. Los aceros inoxidables austeníticos se caracterizan por su alta resistencia a la corrosión y a la oxidación. Sin embargo, tienen una resistencia al desgaste inferior que otros aceros inoxidables como los aceros inoxidables dúplex [1]. Otra característica de los aceros inoxidables dúplex es su elevada resistencia mecánica lo que puede representar en muchos casos un ahorro significativo en costes de material. Los aceros inoxidables constituyen una gran familia de aleaciones metálicas que tienen en común el Hierro (Fe) y Cromo (Cr). Dependiendo del contenido de Cromo cuyo porcentaje mínimo es de 10,5 y de los tratamientos metalúrgicos, pueden mejorar sus propiedades [2].

## 1.1. Composición química de los aceros inoxidables

Los metales más utilizados en los aceros inoxidables son: el Cromo (Cr), el Níquel (Ni), el Molibdeno (Mo) y el Manganeseo (Mg).

El **Cromo** está en el decimotercer rango de los elementos presentes en la corteza terrestre. El mineral principal del Cromo es conocido como Cromita. Los principales yacimientos de Cromita se encuentran en África del sur, en Kazajistán y en Zimbabue. El 80% del Cromo se utiliza en metalurgia, sobre todo para la fabricación de los aceros inoxidables.

El caso del **Níquel** es más complejo que el del Cromo. Este elemento está en el vigesimocuarto rango de los elementos presentes en la corteza terrestre. Su concentración media es de 80 p.p.m. Además, cabe destacar que el precio del Níquel ha seguido variando durante los últimos años y que su uso ha aumentado un 20 % en quince años [2]. Por estas razones, se puede deducir la importancia estratégica del Níquel y el papel que puede jugar en el desarrollo de los aceros inoxidables.

Países productores como Japón y Estados Unidos han buscado un sustituto al Níquel, el **Manganeseo** [2]. Este fue el principio del desarrollo de los grados austeníticos de la serie AISI 200. Los aceros al Manganeseo son mayoritariamente utilizados para los artículos caseros.

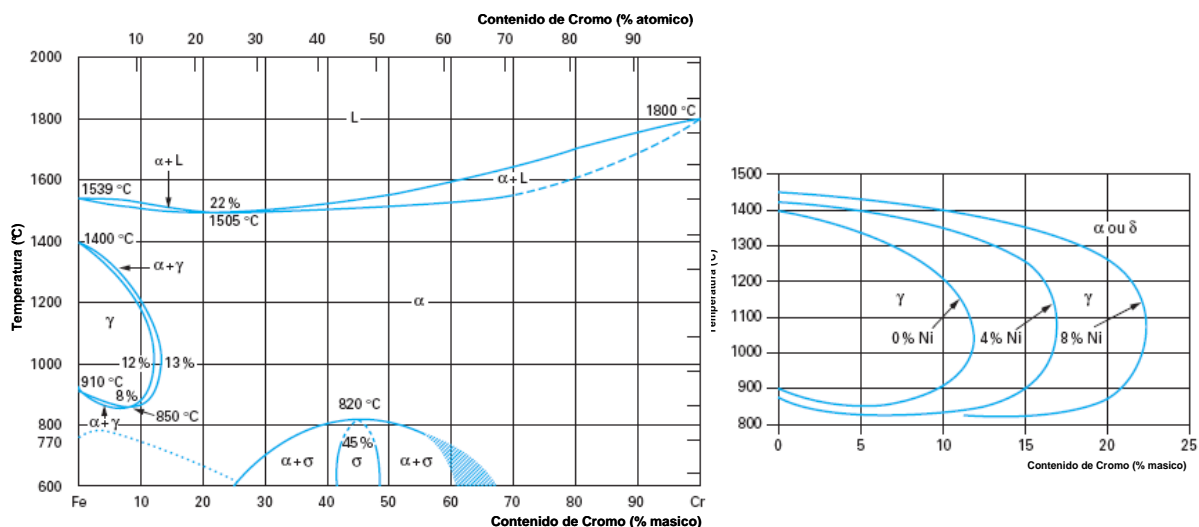


El **Molibdeno** es el tercer elemento de adición utilizado para fabricar aceros inoxidable. El mineral principal del cual proviene es la Molibdenita que contiene 60 % de Molibdeno. El Molibdeno es utilizado sobre todo en los grados austeníticos (2 a 3 %) pero también en los ferríticos (1 a 4 %) y en los austenoferríticos o dúplex (1,5 a 4 %) [2]. Aunque el Molibdeno sólo corresponda al tercer elemento de adición de los aceros inoxidables, este ha jugado un papel importante en el desarrollo de los aceros inoxidables, y particularmente para las aleaciones ferríticas y dúplex.

## 1.2. Estructura de los aceros inoxidables

Desde bajas temperaturas y hasta 910°C, el Hierro tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) conocida como el hierro  $\alpha$ . A partir de 910°C, se transforma en Hierro  $\gamma$  cuya estructura es cúbica centrada en las caras (FCC). A la temperatura de 1400°C, la transformación en Hierro  $\delta$  de estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) ocurre.

En el diagrama binario de equilibrio Hierro – Cromo, presentado en la figura 1.1 a), se puede observar que la fase de austenita  $\gamma$  se limita al interior de una zona en forma de semi-círculo. Esto es debido a la estructura BCC del Cromo que favorece el desarrollo del dominio de la fase de ferrita  $\alpha$ .



**Figura 1.1:** Diagrama de equilibrio de las aleaciones Hierro – Cromo y influencia del añadido de Níquel sobre el dominio de austenita  $\gamma$  [2]



La extensión del dominio de austenita  $\gamma$  se ve influenciada por los otros elementos de adición. Algunos favorecen la existencia de la ferrita  $\alpha$ , son los elementos denominados alfagenos. Los elementos gammagenos son los que favorecen la existencia de la fase de austenita  $\gamma$ . Según el equilibrio entre los diferentes elementos, las aleaciones base Hierro-Cromo- Carbono pueden tener diferentes estructuras:

- ✚ Martensítica después de un tratamiento térmico.
- ✚ Semi-ferrítica después del calentamiento y enfriamiento de una aleación en la zona  $\alpha + \gamma$ .
- ✚ Ferrítica después del tratamiento térmico de una aleación colocada en el dominio ferrítico. Para conseguir esta estructura, es necesario tener un contenido bajo de Carbono para disminuir el riesgo de precipitaciones de carburos de Cromo. El uso de elementos estabilizantes como el Titanio, el Niobio o el Vanadio, permiten disminuir la formación del carburo de Cromo. Los elementos estabilizan el Carbono capturándolo porque tienen una afinidad más grande para el Carbono que para el Cromo.

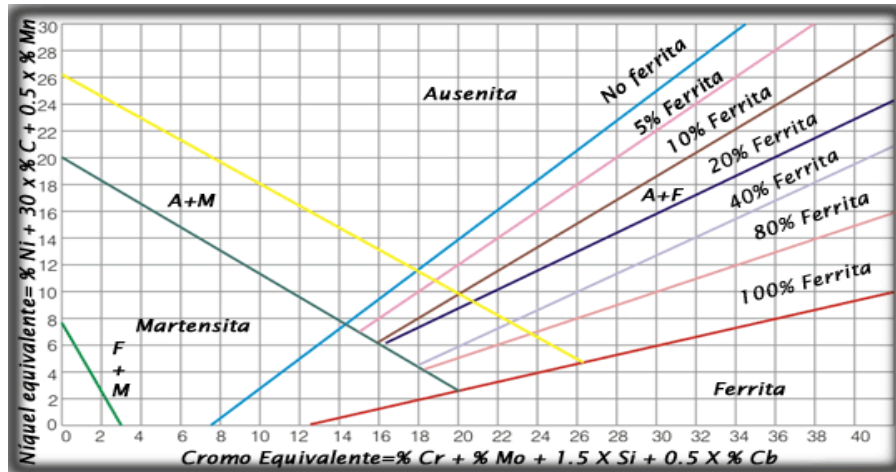
En la figura 1.1 a), se puede observar también la presencia de una fase intermetálica. Es la fase  $\sigma$  que se obtiene por debajo de 820°C. Las aleaciones con altos contenidos de Cromo ( $Cr > 30 \%$ ) son muy sensibles a este fenómeno.

El añadido de Níquel, elemento gammageno, aumenta el dominio de la fase  $\gamma$  como se puede ver en la figura 1.1 b). Nótese que el efecto gammageno del Níquel es menor ante el efecto del Carbono. Por ejemplo, para una aleación que contiene 18 % de Cromo, la estructura es ferrítica para un contenido de Níquel inferior al 2 %. En cambio para un contenido superior al 2 %, se observa la aparición de una estructura austenoferrítica  $\alpha + \gamma$ . Por encima del 4 % de Níquel, el dominio de existencia de la austenita se alarga desde la temperatura de fusión hasta 500°C para contenidos de Níquel del 8 a 10 %. Sabiendo que algunos elementos de la aleación tienen un efecto alfageno, es decir que favorecen la formación de una estructura cristalográfica BCC, como el Cromo mientras que otros tienen un efecto gammageno, es decir que favorecen la formación de una estructura cristalográfica FCC como el Níquel, se han reagrupado los elementos en dos familias:

- ✚ **“Alfagenos”**. Son el Cromo, el Molibdeno, el Silicio (Si), el Titanio (Ti), el Niobio (Nb), el Vanadio (V), el Tungsteno (W), el Aluminio (Al) y el Tántalo.
- ✚ **“Gammagenos”**. Son el Níquel, el Carbono, el Nitrógeno, el Cobalto (Co) y el Manganeso (Mn).



A partir de esta clasificación, se han propuesto diagramas para determinar la estructura de las aleaciones metálicas. El diagrama más representativo es el diagrama de Schaeffler que se puede ver en la figura 1.2. Este diagrama permite prever, a temperatura ambiente, la estructura de soldaduras directamente después de la solidificación rápida.



**Figura 1.2:** Diagrama de Schaeffler de constitución de los aceros inoxidable

A partir de este diagrama, se puede determinar el contenido de cada elemento para conseguir la estructura deseada.

### 1.3. Normas de designación de los aceros inoxidable

La norma europea EN 10027 es la norma relativa al sistema de designación de los aceros. Esta norma se divide en dos partes, la EN 10027 - 1 que es la designación simbólica y la EN 10027 - 2, la designación numérica. La designación simbólica consiste en la atribución de un nombre en función de la composición química. La designación comprende sucesivamente:

- ✓ La letra X
- ✓ El contenido de Carbono multiplicado por 100
- ✓ Los símbolos químicos que indican los elementos de la aleación del acero
- ✓ Los números que indican los valores del contenido de cada elemento

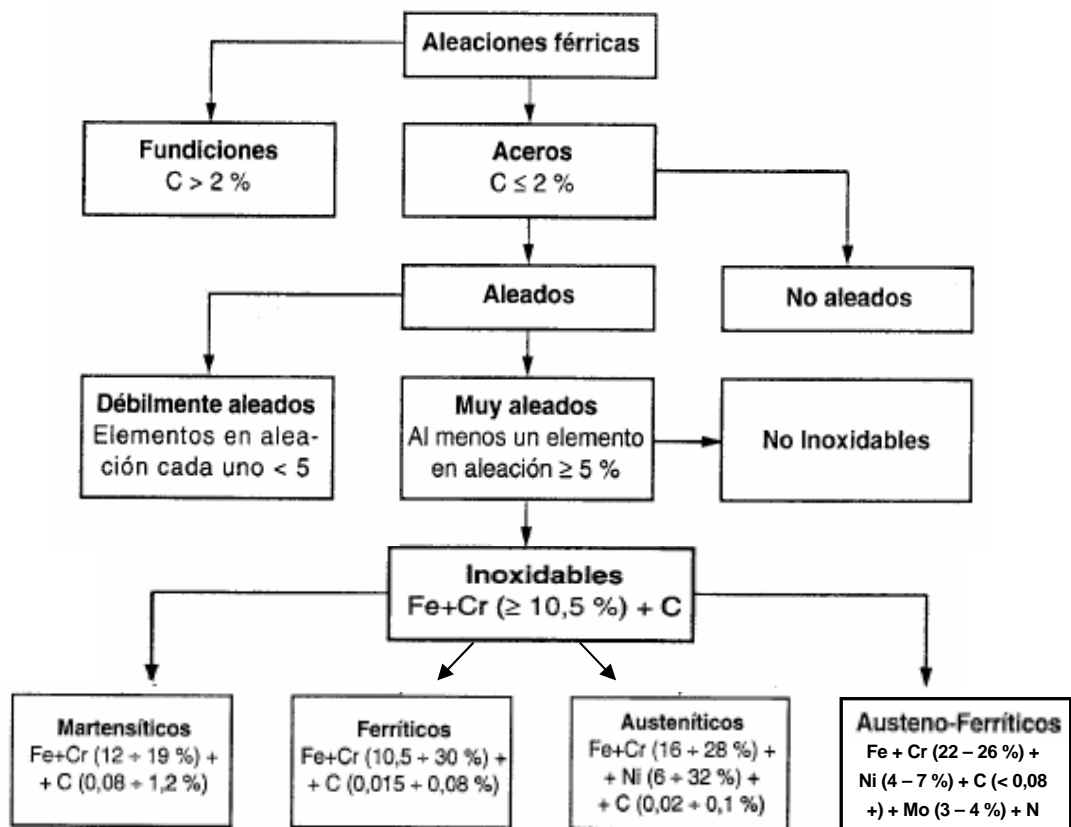




La designación numérica no es obligatoria para los grados de acero nacionales a pesar de que se adapta mejor al tratamiento de datos. En las normas americanas (AISI y ASTM) y japonesa (JIS), la designación de los aceros no depende de la composición química. Los aceros inoxidables austeníticos corresponden a las series 200 y 300 mientras que la serie 400 caracteriza los aceros inoxidables ferríticos según la norma AISI.

## 1.4. Clasificación de los grados de aceros inoxidables

Los aceros inoxidables se clasifican en familias dependiendo de su estructura. La figura 1.3 muestra el diagrama de árbol de los aceros inoxidables, los cuales se encuentran al final de la estructura como consecuencia de su alto grado de aleación.



**Figura 1.3:** Clasificación de las aleaciones férricas [3]



Como se observa en la figura 1.3, los aceros inoxidables se pueden dividir en cuatro grupos en función de su estructura metalúrgica. Cada grupo tiene sus propias características, sobretodo en cuanto a su resistencia mecánica y resistencia a la corrosión.

#### Los aceros inoxidables austeníticos:

En la familia de los aceros inoxidables austeníticos, se distinguen dos grupos: el de los austeníticos al Cromo-Níquel, por una parte y al Cromo-Manganeso por otra. Los aceros inoxidables austeníticos base Hierro – Cromo - Níquel representan el 80 % del mercado mundial. Esto es debido a la estructura cristalográfica FCC que le confiere buena ductilidad y tenacidad en un rango de temperatura de 0 °C hasta 500 °C. El segundo grupo es cuantitativamente más pequeño y está formado por aleaciones de Hierro-Carbono-Cromo-Manganeso-Níquel con contenido de Níquel inferior al 6 %.

#### Los aceros inoxidables ferríticos:

Los aceros inoxidables ferríticos se dividen en tres grupos (Tabla 1.1) en función del contenido de Cromo.

Grupo	Contenido de Cromo (% másico)	Contenido de Carbono (% másico)	Otros elementos
1	10,5 – 13	≤ 0,08	Ti estabiliza C
2	16 – 18	≤ 0,08	Ti, Nb, Zr o V estabilizan C
3	> 20	≤ 0,02	Ti y Nb estabilizan C

Tabla 1.1: Clasificación de los aceros inoxidables ferríticos [2]

El acero inoxidable ferrítico más usado del grupo 1 es el AISI 409 (X2CrTi12/1.4512) que se utiliza mucho en los tubos de escape de los coches porque los contenidos bajos en elementos intersticiales y la estabilización por elementos como el Titanio aseguran una estructura ferrítica. Tal estructura permite alcanzar un buen rendimiento durante el conformado y una buena resistencia a la corrosión.

Otro acero inoxidable ferrítico es el AISI 410S (X2CrNi12/1.4003) utilizado en soldadura gracias a la ausencia del estabilizante del C que permite una transformación martensítica de más de 90 % en la zona afectada por el calor (ZAC). Esta martensita le confiere buena tenacidad y dureza (HV ≈ 300).



Los aceros del grupo 2 se obtienen disminuyendo elementos intersticiales como el Carbono y el Nitrógeno introduciendo uno o dos elementos estabilizadores o añadiendo Molibdeno. La adición de los elementos estabilizadores permite fijar el Carbono y el Nitrógeno de carburos de Titanio y de nitruros de Titanio. Esta estabilización busca evitar la corrosión intergranular.

Los aceros superferríticos corresponden a los aceros del grupo 3. El acero inoxidable referencia es el X2CrMoTi29-4/1.4592. Contiene 29 % de Cromo y 4 % de Molibdeno. Su poco contenido de elementos intersticiales asociado a la estabilización del Titanio le proporciona una buena tenacidad y resistencia a la corrosión en medios muy agresivos.

#### Los aceros inoxidables martensíticos:

La obtención de una estructura completamente martensítica, después de un tratamiento térmico, confiere al acero inoxidable un límite de elasticidad, una resistencia a la ruptura y una dureza muy elevados. Según la norma EN 10020, el contenido máximo de carbono se limita a 1,2 %. El contenido de Cromo se sitúa entre 11,5 % y 18 %, pueden contener hasta 6 % de Níquel y hasta 1,5 % de Molibdeno. Según su composición química, se dividen en cuatro grupos. La figura 1.4 presenta la clasificación empleada para caracterizar los aceros inoxidables ferríticos y martensíticos.

#### Los aceros inoxidables austenoferríticos o dúplex:

Al observar el diagrama de Schaeffler presentado en la figura 1.3, una aleación que contiene más o menos 25 % de Cromo y 5 % de Níquel tendrá, a la temperatura ambiente, y después de un tratamiento térmico adecuado, una estructura formada por ferrita y austenita. Para mejorar la resistencia a la corrosión, se puede añadir Molibdeno lo que baja el contenido de Cromo hasta 22 %. Lo que se pretende es lograr una estructura formada de 50 % de ferrita y 50 % de austenita, lo que corresponde a una **estructura dúplex**.

La aleación más representativa es el **acero X2CrNiMoN22-5-3/1.4462** conocido como **acero inoxidable dúplex 2205**. Esta aleación, cuyo contenido de Cromo y Níquel son respectivamente 22 y 5 %, será el tema de estudio de este trabajo. Este material presenta un compromiso entre una buena resistencia a la corrosión bajo tensión y por picaduras y un límite elástico elevado (casi el doble del límite de elasticidad de los aceros inoxidables austeníticos).



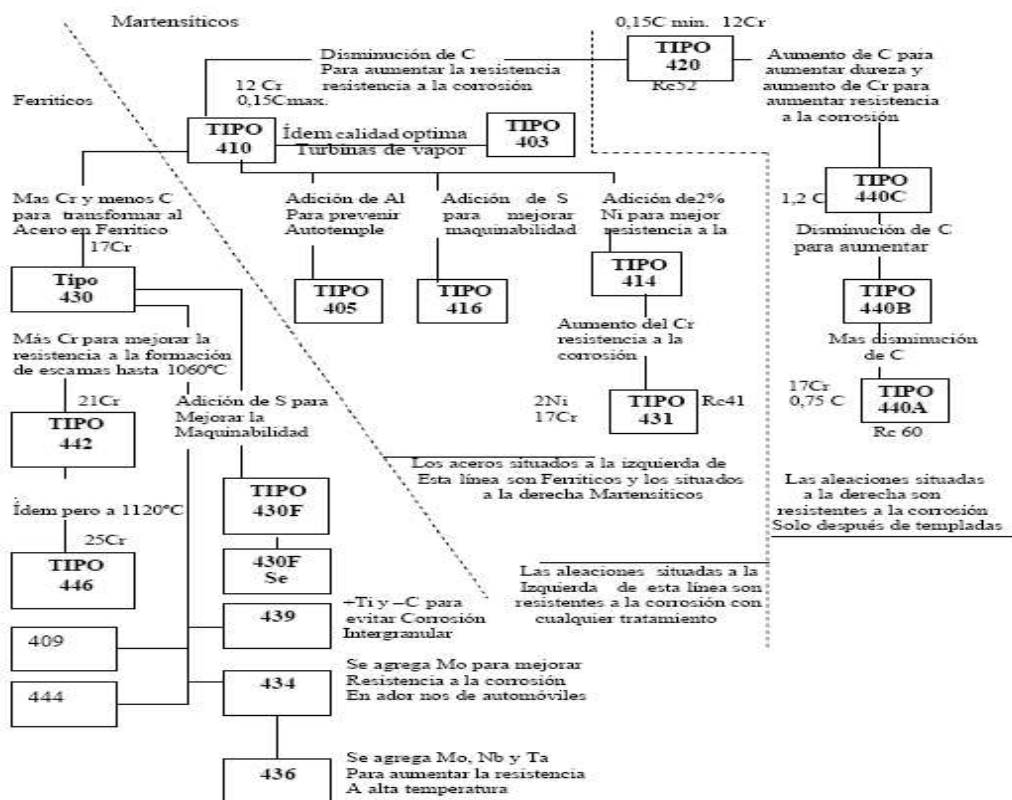


Figura 1.4: Clasificación de los aceros inoxidables ferríticos y martensíticos [4]

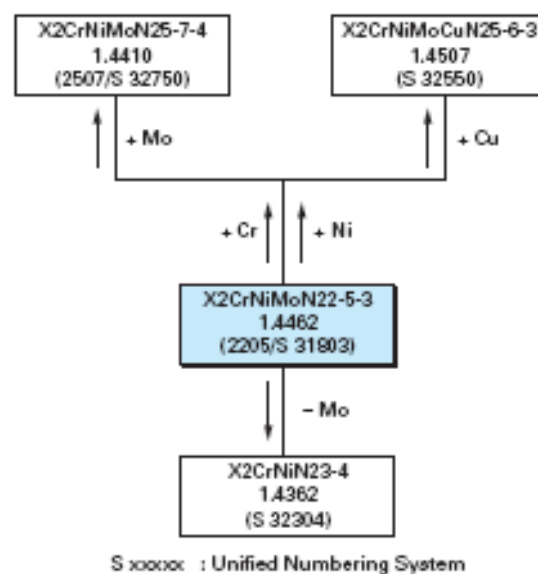


Figura 1.5: Clasificación de los aceros inoxidables dúplex [2]



En la figura 1.5, se pueden identificar las principales aleaciones dúplex desarrolladas. Estas aleaciones presentan buenas propiedades (ductilidad, tenacidad, resistencia a la corrosión) entre  $-40$  y  $275^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo pueden sufrir precipitaciones nefastas entre  $500$  y  $900^{\circ}\text{C}$ .

Los principales precipitados que se pueden encontrar son:

- ✚ Carburos de Cromo  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  que se forman en el límite austenita / ferrita
- ✚ Nitruros de Cromo  $\text{Cr}_2\text{N}$  y  $\text{CrN}$  transgranulares e intergranulares
- ✚ Compuestos intermetálicos como la fase  $\sigma$  ( $\text{FeCr}$ ), la fase  $\chi$  ( $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ ) y una fase de lavas  $\eta$  ( $\text{Fe}_2\text{Mo}$ ).

Los diferentes grados de acero inoxidable dúplex se caracterizan por presentar proporciones similares de austenita y ferrita. Esto se obtiene limitando el contenido de Níquel y aumentando el contenido de Cromo del 22 al 26 %.

Los aceros inoxidables dúplex se pueden clasificar también en diferentes grupos en función de su composición y de sus propiedades.

**El grupo 1** sólo contiene el acero X2CrNiN23-4/1.4362 también conocido como acero inoxidable dúplex 2304. Este acero no tiene mejor resistencia que el acero austenítico AISI 304 pero se clasifica como un acero inoxidable de alta tecnología por su bajo contenido de Carbono y su alto contenido de Nitrógeno. Este nivel de Nitrógeno ofrece una mejor combinación de fabricación y de propiedades de corrosión. Este acero ofrece mejor resistencia y resistencia a la corrosión bajo tensión que los aceros tipo 316L y 317L.

Los **del grupo 2** son los más útiles ya que combinan buenas propiedades de resistencia a la corrosión, facilidad de fabricación y precio. El **acero inoxidable dúplex 2205** forma parte de este grupo.

Los **del grupo 3** contienen 25% de Cromo para producir una mejor resistencia a la corrosión localizada que los del grupo 2. Tienen el defecto de no ofrecer buena resistencia en algunas aplicaciones marinas como las tuberías. El Cromo permite obtener una alta resistencia a los ácidos oxidantes. Este contenido de Cromo hace necesario aumentar el de Níquel para mantener la estructura dúplex lo que los hace costosos.

Los **del grupo 4** consisten en los aceros más aleados de la familia de los dúplex. Los contenidos de Cromo, Níquel, Molibdeno y Nitrógeno ofrecen la mejor resistencia a la corrosión entre los grados dúplex. Por lo que también se les conoce como “aceros inoxidables superdúplex”.



## 1.5. Propiedades de los aceros inoxidables

### 1.5.1. Resistencia a la corrosión

El fenómeno de pasividad se caracteriza por la presencia de una capa fina (espesor de 10 a 20 nm) en la superficie de la aleación metálica lo que disminuye la velocidad de corrosión. Esta capa pasiva, muy solidaria al sustrato metálico, impide todo contacto entre la aleación y los agentes agresivos del medio. Para que se establezca el fenómeno de pasividad, hace falta que la aleación tenga un contenido de Cromo superior a 11%. Los elementos que constituyen la película pasiva son cationes  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$  que tienen una gran afinidad por el Oxígeno. La interpretación electroquímica del fenómeno de corrosión permite explicar la resistencia a la **corrosión uniforme** de los metales puros y de las aleaciones metálicas que se presentan bajo la forma de solución sólida homogénea. Como las aleaciones metálicas presentan heterogeneidades físicas (bordes de grano) y químicas (segregaciones, inclusiones, precipitados), una aleación no se puede asimilar a una solución sólida homogénea. Estas heterogeneidades pueden ser la causa del fenómeno de **corrosión localizada**. Los fenómenos de **corrosión bajo tensión** pueden ser evitados por la elección justa de un grado de aceros inoxidables. La **corrosión intergranular** también se puede evitar eliminando todo tratamiento térmico sensibilizador. Si no se puede eliminar el tratamiento, es aconsejable elegir un acero inoxidable austenítico con bajo contenido de Carbono o un acero inoxidable ferrítico estabilizado. La **corrosión por picadura** (pitting) se produce en una zona pequeña de la superficie de la aleación. Se observa una fractura local de la capa pasiva. La propagación de una picadura puede llegar a la perforación de la muestra. Los elementos de aleación como el Cromo, el Molibdeno y el Nitrógeno tienen un papel importante en cuanto a la resistencia al pitting. Para cuantificar este efecto existe la resistencia equivalente a la picadura (Pitting Resistance Equivalent, PRE) que permite conocer el nivel de resistencia a la corrosión por picaduras. No se define de la misma manera para los diferentes tipos de aceros inoxidables [1]. Así:

Para los aceros inoxidables **ferríticos**:  $\text{PRE} = \% \text{Cr} + 3,3 \times \% \text{Mo}$

Para los aceros inoxidables **austeníticos y dúplex**:  $\text{PRE} = \% \text{Cr} + 3,3 \times \% \text{Mo} + \text{K} \times \% \text{N}$

Para los aceros inoxidables **austeníticos y dúplex** que contienen **Tungsteno**:

$$\text{PRE} = \% \text{Cr} + 3,3 \times \% \text{Mo} + 1,65 \times \% \text{W} + \text{K} \times \% \text{N} \quad (10 \leq \text{K} \leq 30)$$



El dominio de las altas temperaturas se alcanza a partir de 500°C. En general, la exposición a alta temperatura de un acero inoxidable, como puede ser el caso durante un ensayo tribológico, se traduce por una alteración homogénea de su superficie. La resistencia a la **oxidación** de una aleación metálica depende de la formación de una capa de óxidos estables.

### 1.5.2. Propiedades

Las propiedades mecánicas de los grados austeníticos ofrecen una combinación excelente de resistencia, ductilidad y tenacidad en un largo rango de temperaturas. La tabla 1.2 presenta algunas propiedades de los diferentes grupos de aceros inoxidables. Se puede ver que los aceros inoxidables dúplex son los que presentan el mejor límite elástico. Los aceros inoxidables austeníticos presentan una mejor resistencia a la ruptura que los aceros inoxidables ferríticos pero los aceros inoxidables dúplex aprovechan la sinergia de las propiedades de las fases de austenita y de ferrita para presentar la resistencia a la rotura más elevada.

Denominación		Limite elástico a 0,2	Resistencia a la	Alargamiento	Dureza HRB	Coefficiente de dilatación
EN	ASTM	% de deformación	rotura MPa	%		medio a 20 °C 10 <sup>-6</sup> K
<b>Aceros inoxidables austeníticos</b>						
1.4301	304	210 - 230	520 - 720	45	80	17,5
1.4306	304L	200 - 220	500 - 670	45	79	18,0
1.4436	316	220	530 - 730	40	-	17,5
1.4404	316L	220 - 240	520 - 680	45 - 40	79	17,5
1.4541	321	200 - 220	500 - 720	40	80	17,5
1.4450	347	200 - 220	500 - 720	40	85	17,5
<b>Aceros inoxidables ferríticos</b>						
1.4512	409	220 - 280	380 - 560	25	75	11,6
1.4016	430	260 - 280	430 - 630	20 - 18	85	10,5
1.4749	446	380	550 - 585	15 - 13	83 - 84	11,0
<b>Aceros inoxidables martensíticos</b>						
1.4006	410	205 - 450	550 - 850	20 - 12	90	12
<b>Aceros inoxidables dúplex</b>						
1.4462		460 - 480	640 - 950	25 - 20	31	14

**Tabla 1.2:** Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables [5]



Las propiedades de los aceros inoxidables austeníticos permiten un uso en servicio a mayor temperatura que los grados ferríticos y dúplex.

Los aceros inoxidables martensíticos se utilizan casi siempre en estado templado y recocido. Los aceros inoxidables martensíticos presentan propiedades físicas bastante homogéneas. Presentan una densidad media de  $7,7 \text{ kg/dm}^3$  y un límite elástico comprendido entre 205 y 450 MPa.

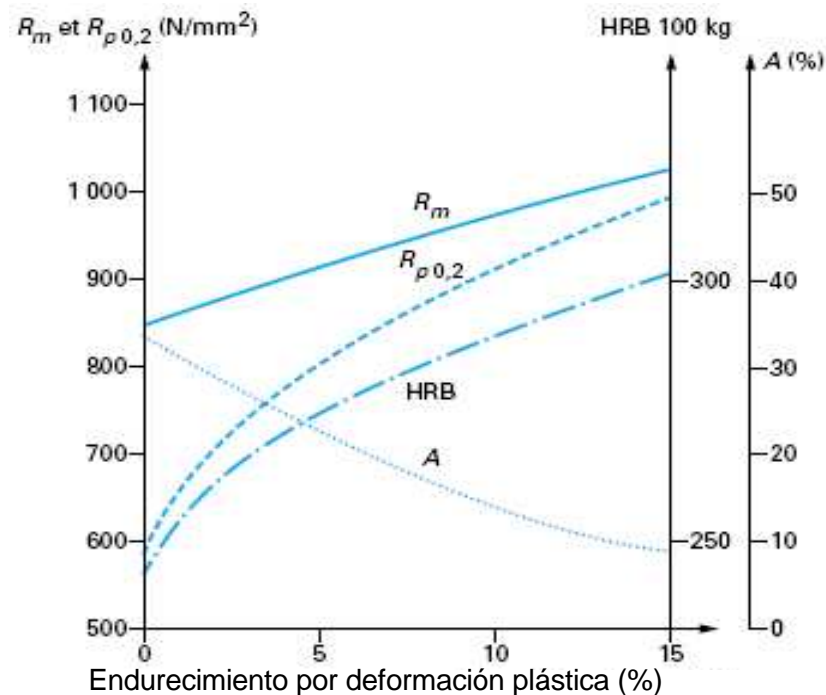
El límite elástico medio para los aceros ferríticos se sitúa en un rango desde 220 MPa hasta 380 MPa. El valor del límite de elasticidad proviene del efecto de endurecimiento del Molibdeno y del Níquel en la ferrita pero también del tamaño de los granos finos que componen la estructura de la ferrita. La ductilidad limitada es también debida a la estructura de la ferrita. Tienen una densidad media de  $7,7 \text{ kg/dm}^3$ , un coeficiente de dilatación lineal entre 20 y  $400^\circ\text{C}$  de  $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Como se observa en la tabla 1.2, los aceros inoxidables ferríticos tienen un coeficiente de dilatación lineal más bajo que los aceros inoxidables austeníticos. El acero inoxidable dúplex 2205 presenta valores intermedios, cerca de los ferríticos. Esta característica es importante para aplicaciones de intercambiadores de calor.

Las propiedades de resistencia a la rotura de los dúplex son las mejores. Su ductilidad se sitúa entre la de los grados ferríticos y austeníticos. Al aumentar el contenido de los elementos de aleación, y particularmente el Nitrógeno, la resistencia aumenta y la ductilidad disminuye. Las buenas propiedades de resistencia de los aceros inoxidables dúplex son debidas a la sinergia de las propiedades de cada fase. La ferrita tiene por efecto de aumentar el límite de elasticidad. Este efecto se combina con la resistencia importante a la rotura de la austenita (interés del endurecimiento por deformación). La resistencia a temperatura elevada y la tenacidad a baja temperatura de los aceros inoxidables dúplex permiten utilizarlos para la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería pero no para las temperaturas criogénicas de servicio, reservadas a los grados austeníticos. El límite de elasticidad de los aceros inoxidables dúplex permite lograr buenas propiedades en fatiga.

En cambio, el alargamiento a la rotura de los aceros inoxidables dúplex es mucho más bajo y su dominio de utilización se limita al rango desde  $-50^\circ\text{C}$  a  $300^\circ\text{C}$ . En la figura 1.6, se puede ver que para el acero 2205 un límite de elasticidad  $R_{p0,2}$  de  $620 \text{ N/mm}^2$  corresponde a una resistencia a la rotura de  $840 \text{ N/mm}^2$  y a un alargamiento del 30%.







**Figura 1.6:** Evolución de las características mecánicas del acero inoxidable dúplex 2205 en función del endurecimiento sufrido [2]

Las curvas de la figura 1.6 muestran que el acero inoxidable dúplex 2205 es poco sensible al endurecimiento, limitado aquí al 15%.

## 1.6. La tribología

La tribología es la ciencia que estudia la interacción entre superficies en movimiento relativo y los problemas relacionados con ellos, como la **fricción**, el **desgaste** y la **lubricación**. La palabra “**tribología**” viene del griego “**tribos**” que significa deslizamiento. El desgaste es la mayor causa de pérdida del rendimiento mecánico de los materiales.

Uno de los objetivos de la tribología es el de minimizar los dos principales inconvenientes del contacto sólido-sólido: fricción y desgaste. Hay situaciones en las que minimizar la fricción y maximizar el desgaste es deseable pero maximizar la fricción y minimizar el



desgaste también puede tener su interés. También, hay casos en los que se busca una fricción y un desgaste máximos. Por ejemplo, una disminución del desgaste sin cambiar la fricción es interesante para las aplicaciones de frenos mientras que el uso de un bolígrafo necesita una reducción de la fricción sin afectar el desgaste.

### 1.6.1 Fricción

La fricción es la resistencia al deslizamiento de un cuerpo sobre o a lo largo de otro. La palabra “fricción” proviene del verbo latino “fricare” que significa “frotar”. No es un concepto nuevo para el ser humano, es el principio de algunas invenciones históricas. El hombre descubrió el calentamiento por fricción al frotar dos piedras para encender un fuego. Más tarde, en la época de la construcción de las pirámides de Egipto, el hombre descubrió que la fricción por rodadura era mucho menor que la fricción por deslizamiento.

En las maquinas en movimiento, la energía perdida por fricción se disipa en el sistema en forma de calor. Este calor debe ser eliminado por enfriamiento para disminuir el daño. Esto limita las condiciones de operación. Una parte de la energía se disipa en el proceso de deformación, lo que lleva al desgaste de las superficies en deslizamiento.

Las leyes fundamentales que gobiernan la fricción de los cuerpos sólidos fueron formuladas por Coulomb en 1785 apoyándose en los trabajos anteriores de Leonardo da Vinci.

Estas leyes enuncian que [6]:

- ✚ La fricción estática es mayor que la fricción cinética.
- ✚ La fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.
- ✚ La fuerza de fricción es proporcional a la carga aplicada.
- ✚ La fuerza de fricción es independiente de la superficie de contacto.

La fricción se caracteriza por el **coeficiente de fricción  $\mu$** . El coeficiente de fricción es la relación entre la fuerza de fricción  $F$  y la carga aplicada  $N$ .

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

El coeficiente de fricción se sitúa en un rango de 0,03 para un rodamiento muy lubricado hasta 0,5 – 0,7 para un deslizamiento en seco e incluso 5 para superficies limpias al vacío [6].



Un cuerpo de peso  $P$  sobre una superficie plana empieza a moverse cuando la superficie se inclina de un cierto ángulo, el ángulo de fricción  $\theta$ . El coeficiente de fricción estático  $\mu_s$  es tal que:

$$\mu_s = \tan \theta \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Actualmente se sabe que el coeficiente de fricción depende de muchos parámetros como la limpieza de las superficies en contacto, la zona de contacto, la topografía de las superficies, la presencia o no de óxidos,...etc. Por esto, el coeficiente de fricción no es una propiedad intrínseca de un material. Además, otro aspecto que se debe tener en cuenta es que las superficies en contacto no son completamente lisas a nivel microscópico. Cuando dos superficies están en contacto, se tocan por las puntas de las rugosidades. En estas puntas, la presión de contacto casi se asimila a la dureza del material más blando y una deformación plástica tiene lugar a una escala local. La mayoría de la energía disipada durante la fricción se convierte en calor lo que provoca un aumento de la temperatura local de la probeta. Utilizando las leyes de conservación de energía y transferencia de calor, es posible calcular este aumento de temperatura.

La evaluación de la temperatura local en el punto de contacto se puede estimar utilizando la teoría de Blok, Jaeger y Archard [7]. En este análisis se tienen en cuenta las siguientes hipótesis:

- ✚ Las propiedades de los cuerpos en contacto se mantienen constantes.
- ✚ La zona de contacto se considera como una fuente de calor plana.
- ✚ El calor es generado por fricción uniformemente en la zona de contacto.
- ✚ Todo el calor producido es conducido a través de los sólidos en contacto.
- ✚ El coeficiente de fricción del par de material se estabiliza.

Por tanto, el calor generado por la fricción se define como:

$$Q = A \times q \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Donde  $Q$  es el calor generado (W),  $q$  es el flujo de calor ( $\text{W/m}^2$ ),  $A$  es el área de contacto ( $\text{m}^2$ ).

Esta generación de calor por fricción se puede expresar en función del coeficiente de fricción  $\mu$ , de la carga aplicada  $N$  y de la velocidad  $v$  de deslizamiento de tal forma que:

$$Q = \mu \times N \times v \quad (\text{Ec. 1.4})$$



Para determinar el régimen de transferencia de calor, se introduce el numero adimensional de Peclet que permite ofrece información sobre la transferencia de calor en la superficie de contacto. El número Peclet  $L$  se define como [7]:

$$L = v \times a \times 2\chi \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Donde  $a$  es el radio de contacto (m) y  $\chi$  es la difusividad térmica ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). Esta última se calcula mediante la ecuación:

$$\chi = \kappa / \rho \cdot \sigma \quad (\text{Ec. 1.6})$$

Donde  $\kappa$  es la conductividad térmica ( $\text{W/m.K}$ ),  $\rho$  es la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) y  $\sigma$  es el calor específico ( $\text{J/kg.K}$ ).

A partir del número Peclet obtenido, se definen tres regimenes posibles de transferencia de calor y se plantean las ecuaciones para determinar la temperatura máxima local en la superficie de contacto. Así:

$L < 0,1$ : Una superficie se mueve lentamente con respecto a otra.

$0,1 < L < 5$ : Una superficie se mueve más rápidamente que otra y se considera que una fuente de calor se mueve lentamente.

$L > 5$ : Una superficie se mueve rápidamente con respecto a otra y el tiempo necesario para que la distribución de temperatura se establezca en el cuerpo estacionario no es suficiente. La profundidad en la cual penetra el calor dentro del cuerpo estacionario es muy pequeña comparado con las dimensiones del contacto.

Las ecuaciones de temperatura son dadas en términos del calor creado a nivel de la zona de contacto. Se considera que la proporción de calor se disipa de la misma manera dentro de los cuerpos.

Para  $L < 0,1$ : 
$$T_{f_{\max}} = 0.222 \frac{\mu v}{K} \left( p_y N \right)^{0.5} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Donde  $p_y$  es el límite de elasticidad (Pa)

Para  $0,1 < L < 5$ : 
$$T_{f_{\max}} = 0.222 \beta \frac{\mu v}{K} \left( p_y N \right)^{0.5} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Donde  $\beta$  es un coeficiente que varia desde 0,50 para  $L = 5$  hasta 0,95 para  $L = 0,1$ .

Para  $L > 5$ : 
$$T_{f_{\max}} = 0.726 \gamma \mu p_y \left( \frac{v}{K \rho \sigma} \sqrt{\frac{N}{p_y}} \right)^{0.5} \quad (\text{Ec. 1.9})$$



Donde  $\gamma$  es un coeficiente que varia desde 0,72 para  $L = 5$  hasta 0,92 para  $L = 100$ . Si  $L > 100$ ,  $\gamma = 1$ . Un aumento de la temperatura local de la superficie de un material puede tener una influencia sobre su comportamiento al desgaste.

### 1.6.2 Desgaste

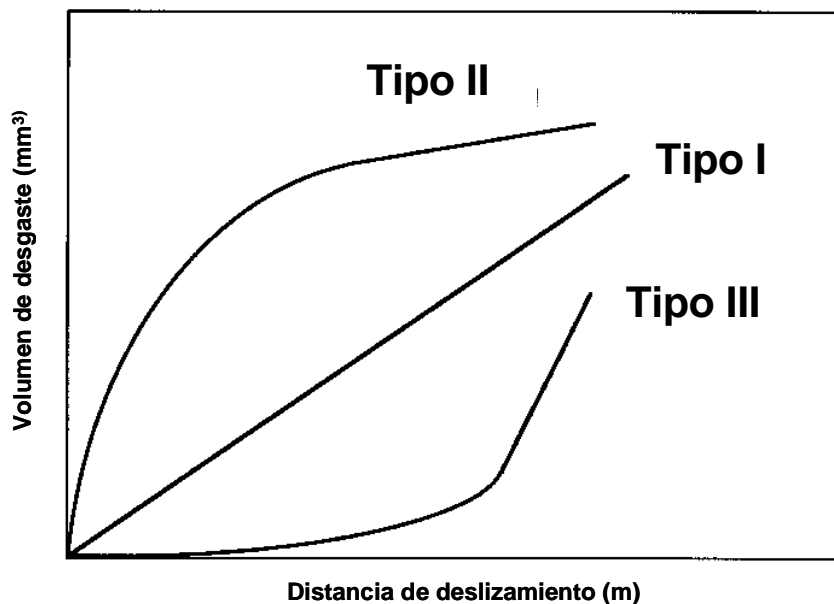
El desgaste se define como la pérdida de material entre las superficies en contacto. La mayoría de las maquinas disminuyen su eficacia y su fiabilidad por culpa del desgaste. Por tanto, el control del desgaste es necesario para desarrollar maquinas fiables. La tasa de desgaste puede variar en un rango de  $10^{-15}$  a  $10^{-1}$  mm<sup>3</sup>/Nm, dependiendo de las condiciones de operación. Este dato nos indica que la clave del control del desgaste se encuentra en la buena elección de las condiciones de operación y de los materiales. En este sentido, existen diagramas de desgaste que permiten predecir los mecanismos y la tasa de desgaste. Los diagramas son muy útiles para describir las condiciones tribológicas y elegir los materiales en un amplio rango de condiciones de operación. Con el fin de describir los tribosistemas y de seleccionar los materiales apoyándose en los diagramas de desgaste, el conocimiento de los diferentes mecanismos y tipos de desgaste es imprescindible.

El desgaste es el resultado de la pérdida de materia por la separación física debido a microfractura, disolución química o a la fusión de las zonas en contacto. Los tipos de desgaste se pueden clasificar como: por adhesión, por abrasión, por fatiga, por corrosión, por "fretting", por erosión,...etc. Los mecanismos dominantes de desgaste cambian de uno a otro por razones tales como los cambios de propiedades de la superficie del material, el calentamiento por fricción, la formación de capas,...etc.

Uno de los métodos para evaluar el desgaste es por la cantidad de volumen perdido y por el estado de desgaste de la superficie. Este método consiste en pesar la probeta antes y después del ensayo. Otro método utilizado es la variación linear que se realiza midiendo las variaciones de las dimensiones de la probeta. El método de medición del área es una buena opción para determinar el volumen desgastado cuando el desgaste se ve localizado en una zona específica. En algunos casos como en el caso de un desgaste irregular, es necesario medir el desgaste mediante el cálculo del volumen de desgaste lo que permite una alta precisión de los resultados [8].

El grado de desgaste se describe por la tasa del desgaste, la tasa específica de desgaste o el coeficiente de desgaste. La tasa de desgaste se define como el volumen de desgaste por unidad de distancia lo que corresponde a la pendiente de la curva de volumen de desgaste. La tasa específica de desgaste se define como el volumen de desgaste por unidad de distancia y de carga. El coeficiente de desgaste se define como el producto de la tasa específica de desgaste por la dureza del material desgastado.



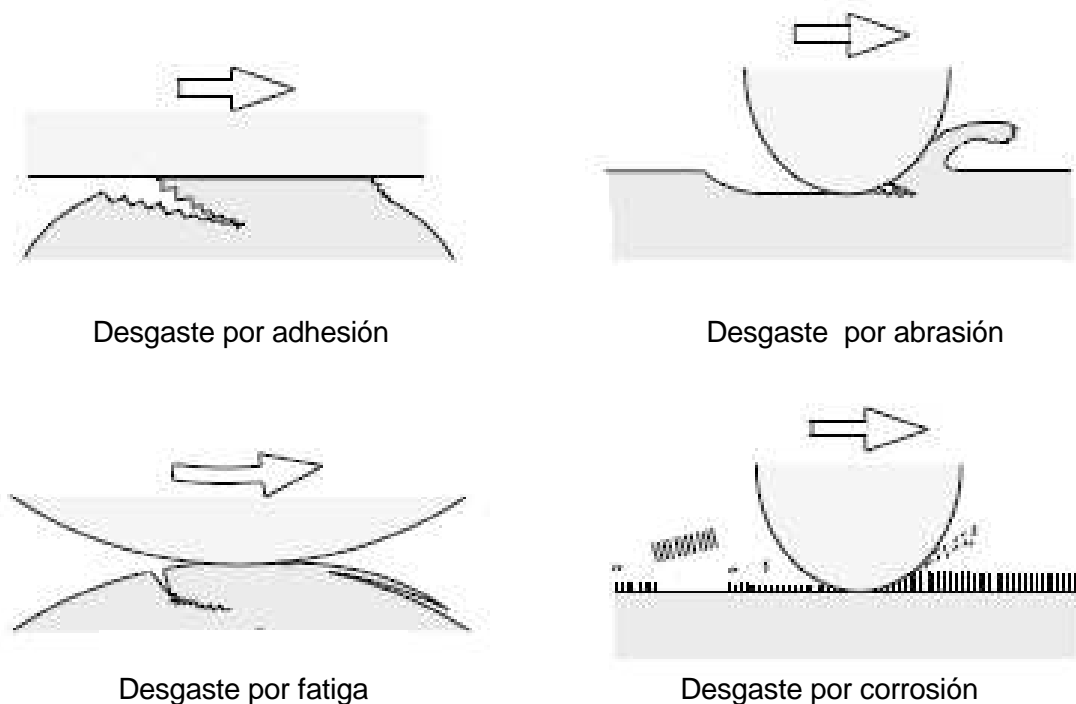


**Figura 1.7:** Mecanismos de desgaste más comunes en deslizamiento

El volumen de desgaste, la rugosidad de la superficie desgastada y la forma de las partículas de desgaste pueden dar información importante para caracterizar el desgaste. En la figura 1.7, se pueden observar tres diagramas típicos del volumen de desgaste. El tipo I corresponde a una tasa de desgaste constante a lo largo de la distancia de deslizamiento. El tipo II deja aparecer una transición de una tasa de desgaste “severa” a una tasa “media” y constante. Este tipo de desgaste normalmente se presenta en los metales. El tipo III caracteriza una transición catastrófica de una tasa de desgaste “baja” a una tasa de desgaste “alta”. Este tipo de desgaste se presenta en los materiales cerámicos.

Los tipos de desgaste más comunes en deslizamiento se pueden clasificar como: desgaste por adhesión, desgaste por abrasión, desgaste por fatiga y desgaste por corrosión. En la figura 1.8 se muestra un esquema de los cuatro tipos mencionados.





**Figura 1.8:** Tipos de desgaste más comunes en deslizamiento [7]

Los **tipos de desgaste por adhesión y por abrasión** son los generados por un contacto plástico. En el caso de un contacto plástico entre materiales similares, la interfaz del contacto tiene fuerzas de adhesión por la formación de puentes entre átomos. Cuando la pérdida de material es el resultado de una fuerte adhesión a la interfaz del contacto, el desgaste resultante se llama **desgaste por adhesión**. En el caso de un contacto plástico entre un material duro y uno más blando, el material más duro penetra en el material más blando. Si la pérdida de material ocurre por una micro-cortadura (micro-cutting) del material, el desgaste resultante es conocido como **desgaste por abrasión**.

En el caso de un contacto repetitivo, la pérdida de material se genera después de varios ciclos. En este caso, la pérdida de material de la superficie se debe al **desgaste por fatiga**.

En el caso de un contacto en un medio corrosivo, la reacción triboquímica a nivel del contacto se ve acelerada y el desgaste resultante se conoce como **desgaste por corrosión**. En el aire, el agente más corrosivo es el Oxígeno y el desgaste triboquímico de los metales en el aire es generalmente llamado **desgaste por oxidación**.



La pérdida de material en los desgastes adhesivos, abrasivos y por fatiga (“**desgastes mecánicos**”) está gobernada por la deformación plástica y la rotura en la zona de contacto mientras que la pérdida de materia debida al desgaste corrosivo (“**desgaste triboquímico**”) proviene del crecimiento de una capa por reacción química sobre la superficie desgastada.

### ➤ El desgaste por adhesión

Sí la interfaz de contacto entre dos superficies bajo contacto plástico presenta una fuerza de adhesión, capaz de resistir al deslizamiento relativo, se produce una deformación plástica importante. Esta deformación plástica se produce por la compresión y cizallamiento en la zona de contacto. Como resultado, se inicia una grieta y se propaga. Si la grieta alcanza la interfaz de contacto, se forma una partícula de desgaste y una transferencia por adhesión tiene lugar.

Suponiendo que el contacto real se constituye de “n” puntos de contacto de tamaño idéntico y que un nuevo punto se forma cada vez que un punto de contacto desaparece, se puede aproximar que el número total de contactos “n” se queda constante durante el deslizamiento.

Considerando una zona de contacto circular de radio a, el volumen de desgaste de las partículas generadas después de un deslizamiento de 2a corresponde al volumen de la semi-esfera  $2\pi a^3 / 3$ .

Basándose en estas consideraciones, el volumen de desgaste adhesivo posible para “n” puntos de contacto después de una distancia L de deslizamiento está dado por [9]:

$$V = n \cdot \frac{2}{3} \pi a^3 \cdot \frac{L}{2a} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

Visto que la presión normal de contacto con deformación plástica vale casi el valor de dureza H del material desgastado [9], el área total de contacto para “n” puntos  $n\pi a^2$  se expresa de tal manera que:

$$n\pi a^2 = \frac{W}{H} \quad (\text{Ec. 1.11})$$

Utilizando las ecuaciones 1.8 y 1.9, se puede determinar el volumen de desgaste bajo una carga normal W después de una distancia de deslizamiento L dada por:

$$V = \frac{1}{3} \cdot \frac{WL}{H} \quad (\text{Ec.1.12})$$





Esta última ecuación muestra que el volumen de desgaste adhesivo es proporcional a la carga normal y a la distancia de deslizamiento e inversamente proporcional a la dureza del material que se desgasta. Tomando en cuenta la ecuación 1.11, el volumen de desgaste adhesivo  $V$  es claramente proporcional al área real de contacto durante el deslizamiento. El desgaste adhesivo puede tener lugar a través de varios modos y el tamaño de las partículas de desgaste no se puede asimilar al tamaño del contacto. Además, las partículas de desgaste pueden provenir no sólo del material más blando. Por esta razón, se introduce en la ecuación 1.11 un parámetro  $K_{ad}$  que toma en cuenta estas variables:

$$V = K_{ad} \cdot \frac{WL}{H} \quad (\text{Ec. 1.13})$$

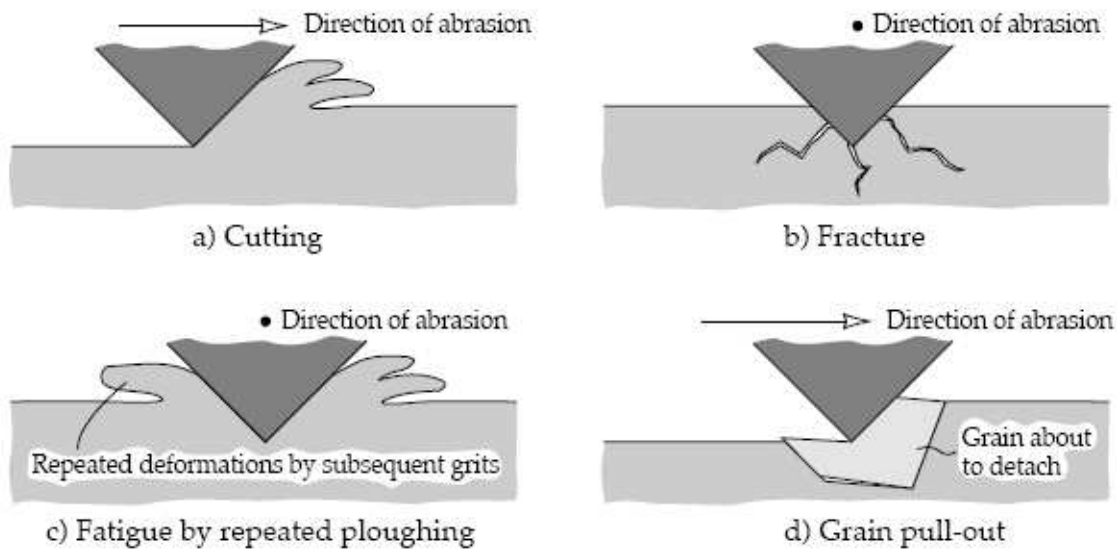
El parámetro  $K_{ad}$  se llama el coeficiente de desgaste adhesivo. Es un valor inherente a cada par de materiales en contacto que permite describir la tasa de desgaste por adhesión. El coeficiente  $K_{ad}$  corresponde a la fracción de volumen de desgaste a nivel del contacto plástico y depende mucho de parámetros tales como las propiedades de los materiales en contacto y de la geometría de la zona de contacto. El coeficiente  $K_{ad}$  puede variar entre  $10^{-7}$  y  $10^{-2}$  en función de las condiciones de operación y de las propiedades del material [9].

### ➤ El desgaste por abrasión

El desgaste por abrasión ocurre cuando un cuerpo sólido está presionado contra otro que tiene una dureza igual o mayor. La complejidad para prevenir y controlar el desgaste abrasivo proviene del hecho que hay varios mecanismos que pueden intervenir. Estos mecanismos tienen características diferentes pero pueden intervenir simultáneamente.

La pérdida de material puede ocurrir por microcorte (microcutting), microfractura (microfracture), desconche (pull-out) y fatiga. Estos mecanismos se muestran en la figura 1.9.



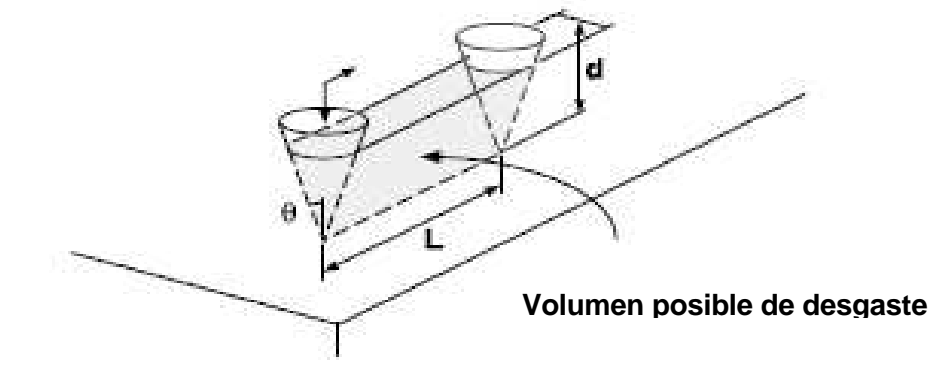


**Figura 1.9:** Mecanismos de desgaste para el desgaste por abrasión [7]

El primer mecanismo, el microcorte, representa el modelo clásico en el que la punta dura del pin corta la superficie más blanda. El corte siempre está presente pero es más marcado en los materiales frágiles. Los últimos mecanismos que se muestran representan la fractura y el desconche que ocurren más a menudo en materiales frágiles.

Para evaluar el volumen de desgaste por abrasión, se introduce un modelo de contacto simplificado en el que el pin tiene una forma cónica con un ángulo  $\theta$  y se introduce una profundidad  $d$ . La figura 1.10 presenta estos datos.





**Figura 1.10:** Modelo del desgaste por abrasión causado por un pin en deslizamiento sobre un disco [9]

El volumen posible de desgaste abrasivo después de una distancia de deslizamiento  $L$  está dado por [9]:

$$V = d^2 \cdot \tan \theta \cdot L \quad (\text{Ec. 1.14})$$

Como la presión normal de contacto bajo contacto plástico se puede asimilar a la dureza  $H$  del material que se desgasta, el área total de contacto se expresa de la manera siguiente:

$$\frac{1}{2} \pi (d \cdot \tan \theta)^2 = \frac{W}{H_v} \quad (\text{Ec. 1.15})$$

Utilizando las ecuaciones 1.12 y 1.13, se encuentra el volumen desgastado  $V$  bajo una carga normal  $W$  después de una distancia  $L$  de deslizamiento.

$$V = \frac{2}{\pi \cdot \tan \theta} \cdot \frac{WL}{H_v} \quad (\text{Ec. 1. 16})$$

Esta última ecuación nos da el volumen de desgaste en el caso de una microcorte ideal.

$$V = K_{ab} \cdot \frac{WL}{H} \quad (\text{Ec. 1.17})$$

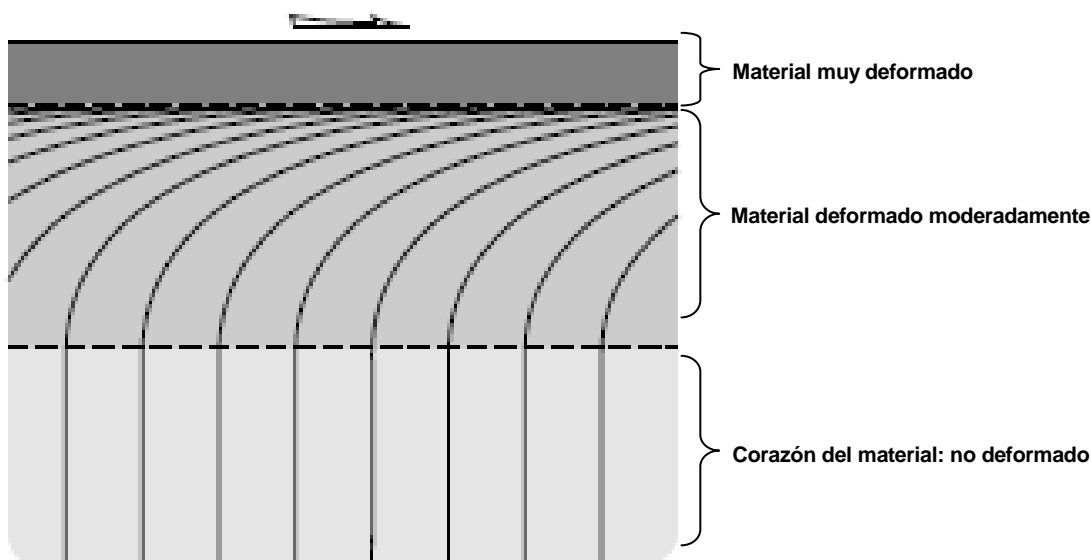
La constante de proporcionalidad  $K_{ab}$  se llama coeficiente del desgaste por abrasión y puede variar entre  $10^{-4}$  y  $10^{-1}$  en función de las condiciones de contacto y de los parámetros. El coeficiente de desgaste por abrasión es más importante que el coeficiente de desgaste por adhesión lo que justifica el uso del adjetivo severo para caracterizar el desgaste por abrasión.



### ➤ El desgaste por fatiga

La fricción entre materiales metálicos provoca el desgaste de la interfaz de contacto pero este desgaste no es siempre severo. El “ploughing”, por ejemplo, es un modo en el que no se genera partículas de desgaste pero, el material es desplazado hacia el exterior de la pista de desgaste. En este mecanismo, la ruptura por fatiga puede ocurrir después de un cierto número de ciclos de deformación, es decir después de una cierta distancia de deslizamiento.

Si se examina la sección transversal de la superficie desgastada. Esta puede revelar la presencia de una deformación por cizalla intensa del material justo por debajo de la superficie. La figura 1.11 refleja como la orientación microestructural se orienta paralelamente a la superficie que se desgasta.

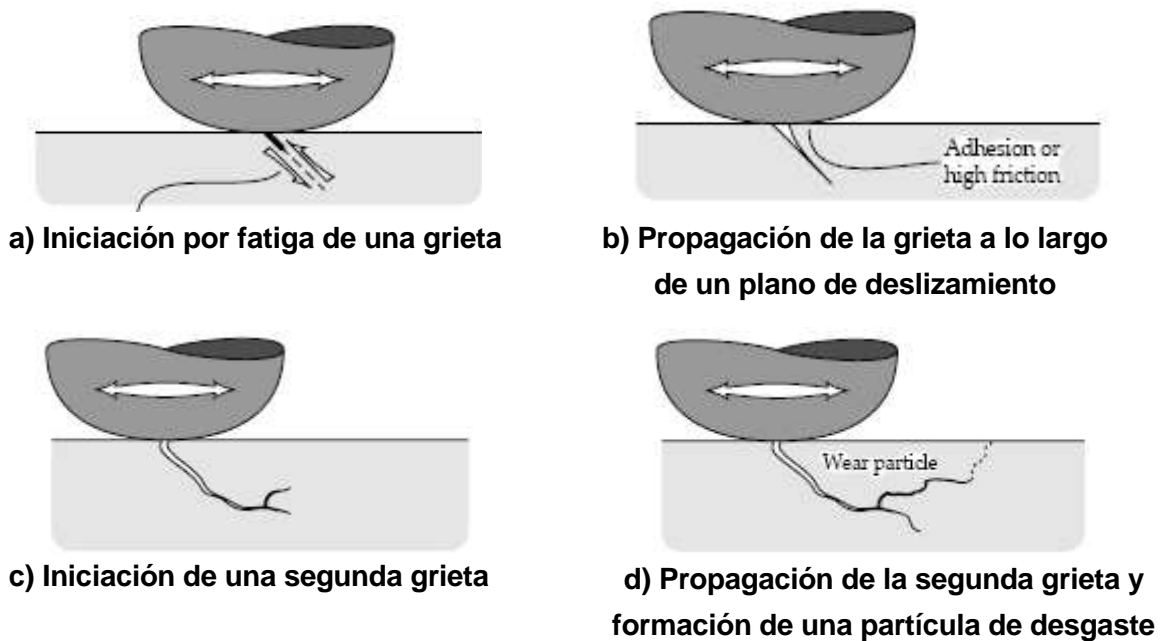


**Figura 1.11:** Niveles de deformación en una superficie desgastada por fatiga [9]

El mecanismo de iniciación de grietas de superficie por fatiga se ilustra en la figura 1.12. La primera grieta se origina en una zona débil de la superficie y se propaga a lo largo de planos débiles tales que los planos de deslizamiento o los bordes de las células de dislocaciones. Una segunda grieta se puede iniciar a partir de la primera o la primera grieta puede también conectarse con una grieta de superficie existente. Si la grieta iniciada alcanza la superficie, una partícula de desgaste se puede formar.



Otro tipo de grietas que se presenta durante el desgaste por fatiga es el agrietamiento por debajo de la superficie por fatiga. En este caso, la deformación justo por debajo de la superficie alcanza niveles muy altos pero no contribuye al crecimiento de la grieta hacia la superficie. Una grieta se puede formar justo por debajo de la superficie donde el campo de tensiones es bastante intenso para producir la iniciación de una grieta.



**Figura 1.12:** Ilustración del agrietamiento y de la formación de partícula por fatiga [7]

#### ➤ El desgaste por corrosión

Las reacciones químicas en la superficie permiten disminuir el desgaste por abrasión. Si el material se corroe durante el deslizamiento, pueden presentarse los siguientes procesos:

- La película lubricante disminuye la formación de corrosión y de desgaste
- El desconchamiento de esta película se puede producir bajo el contacto de deslizamiento y una tasa alta de desgaste ocurre como respuesta a la formación y a la destrucción de las películas



- La película protectora de la superficie se puede desgastar (picaduras) y una corrosión rápida de la superficie desgastada puede tener consecuencias graves

Hay una transición entre una corrosión suficiente para formar películas protectoras y el desgaste adhesivo. Esta transición depende de la carga aplicada. Si la carga aumenta, las asperezas de las superficies en contacto se tocan mucho más a menudo. Por esta razón, la reactividad del medio corrosivo tiene que ser más importante en el caso de una carga aumentada.

La abrasión puede también acelerar la corrosión por la eliminación de la película protectora y una pérdida rápida de material ocurre. Este mecanismo de desgaste aparece cuando la tasa de desgaste bajo deslizamiento en seco es menor que la tasa de corrosión sin desgaste por abrasión. Si la abrasión mecánica es más intensa, los efectos de la corrosión se vuelven insignificantes.

Cuando la corrosión y el desgaste ocurren simultáneamente, hay una interacción mutua importante. Excepto en el caso de un grado de corrosión limitado, la reacción de formación de una capa es esencial para prevenir el desgaste. Esta interacción causa una aceleración de pérdida de material. Una solución para remediar a este problema es de quitar el agente corrosivo o la sustitución del material por otro inerte. La reducción de la temperatura en el contacto de deslizamiento disminuye la tasa de corrosión y ayuda también a minimizar el daño global por desgaste. Los inhibidores de corrosión pueden ser eficaces para controlar el desgaste corrosivo.

### ➤ **El desgaste por oxidación**

El desgaste por oxidación es el desgaste de los metales no lubricados en presencia de aire o de Oxígeno. Se ha observado que si la carga y la velocidad de deslizamiento son bastantes importantes para aumentar la temperatura de contacto hasta varias centenas de grados Celsius, la viruta de desgaste cambia de partículas metálicas a óxidos de Hierro [10]. Si una capa de óxidos se forma sobre la superficie desgastada, el desgaste es “leve” pero si no hay formación de una capa de óxidos, el desgaste es “severo” y gobernado por la adhesión y la abrasión.

Las películas de óxido están presentes en la mayoría de los metales expuestos al Oxígeno. La tasa de oxidación de los metales depende de la temperatura. La cinética de la oxidación tiene una influencia sobre el desgaste oxidativo. A las temperaturas bajas ( $\approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), la oxidación de la superficie es rápida y seguida por la pasivación de la superficie lo que limita el espesor de la capa de óxidos ( $\approx 2\text{ nm}$  para los aceros con  $T$  inferior a  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Sí la



temperatura del acero se ve aumentada (500 °C por ejemplo), una oxidación ilimitada ocurre lo que resulta en un espesor de película de óxidos hasta 10 nm [6].

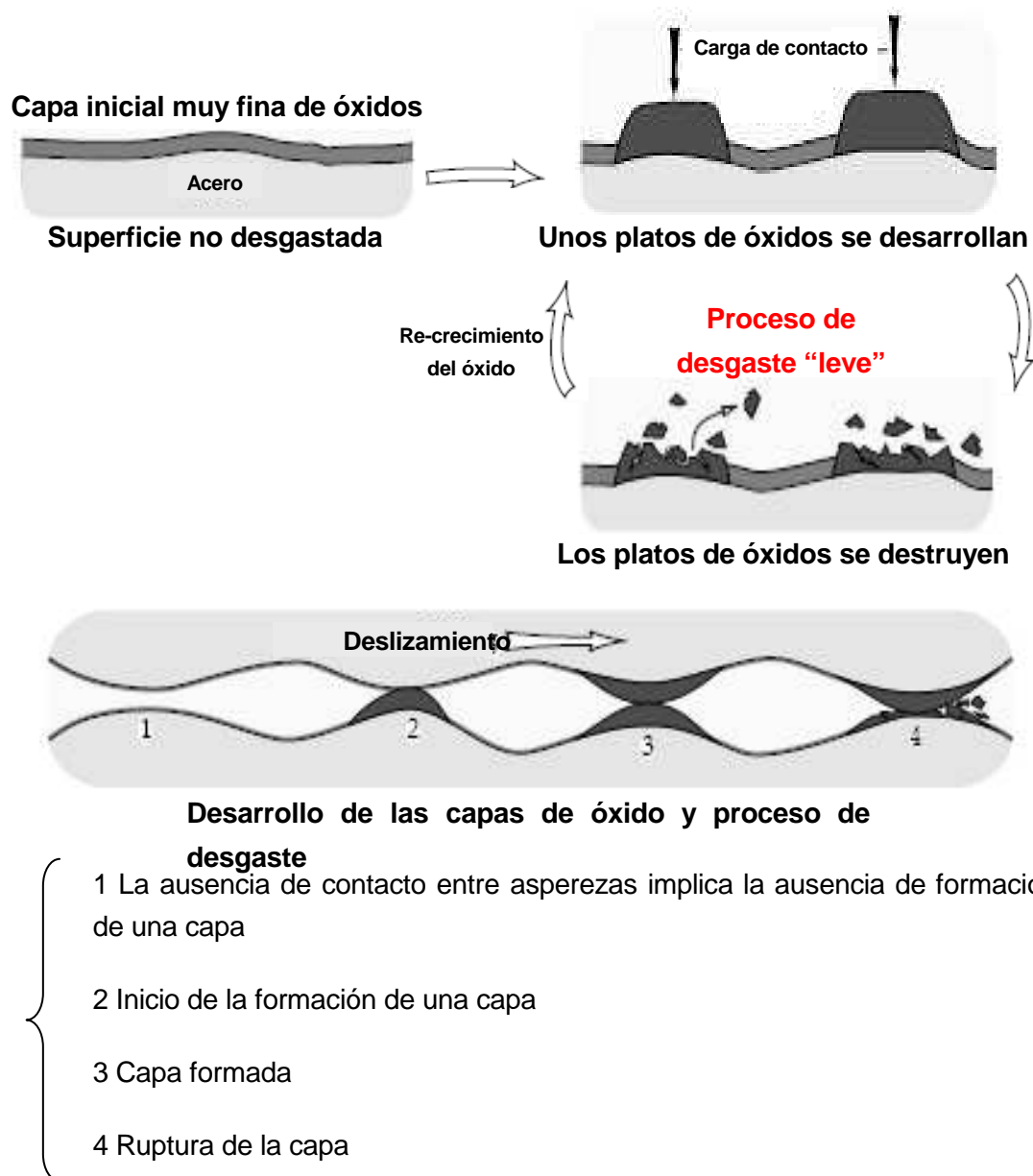
A velocidades de deslizamiento por encima de 1 m/s, la temperatura local de superficie puede alcanzar varias centenas de grados Celsius y si la carga es lo bastante pequeña para permitir un desgaste “medio”, unas capas de óxidos se pueden formar sobre la superficie desgastada. Bajo estas condiciones, la oxidación se produce rápidamente. A nivel del contacto de deslizamiento, a velocidad alta, las películas finas de óxidos presentes en la superficie son destruidas y la fricción y el desgaste aumentan hasta un desgaste “severo”. Luego, mediante un proceso todavía poco entendido, la superficie desgastada se recubre y se logra un estado de desgaste “leve”. Durante el deslizamiento, cuando el espesor de una capa de óxidos alcanza un valor crítico, la capa no puede aguantar la carga ni las tensiones de cizalla de fricción y la capa desaparece. Otro mecanismo que lleva a la eliminación de las capas es la fatiga iniciada después de un cierto número de contactos con la superficie opuesta. La figura 1.13 presenta el proceso de formación y de eliminación de las capas de óxidos.

A velocidades altas de deslizamiento, las asperezas de la superficie sufren periodos cortos a alta temperatura de oxidación cuando hay contacto con las asperezas de la superficie opuesta. La cinética de oxidación es gobernada por la temperatura que se alcanza en los puntos de contacto. La frecuencia y la duración de estos periodos determinan la tasa de desgaste bajo estas condiciones. El modelo de desgaste por oxidación se basa en las teorías clásicas de la oxidación a alta temperatura que no toman en cuenta las diferencias entre la oxidación bajo “condiciones estáticas” y la “tribo-oxidación”. Por ejemplo, la temperatura de una capa de óxido en corrosión estática es uniforme. Al contrario, la “tribo-oxidación” puede generar una variación de la temperatura de la capa de óxido lo que afecta a la tasa de oxidación.

A velocidades bajas de deslizamiento, la capa de óxido muy fina que se forma, por presencia de aire, se desgasta rápidamente y resulta un periodo de desgaste “severo”. A velocidades por debajo de 1 m/s, las subidas de temperatura por fricción no son bastante importantes para provocar la oxidación rápida de la punta de las asperezas. Aunque las capas de óxido se formen a nivel de la superficie desgastada, sólo provienen de la aglomeración de la viruta de desgaste en lugar de una oxidación. Los óxidos fracturados y las partículas metálicas oxidadas se compactan para formar “islas de oxido” en la superficie desgastada. El área de estas “islas” aumenta con la distancia de deslizamiento. El desarrollo de las “islas” lleva una reducción del coeficiente de fricción.



Por debajo de esta primera película, hay una mezcla de óxidos más grandes y de partículas oxidadas. La figura 1.14 presenta el proceso que provoca la formación de las capas de óxidos a velocidades bajas.

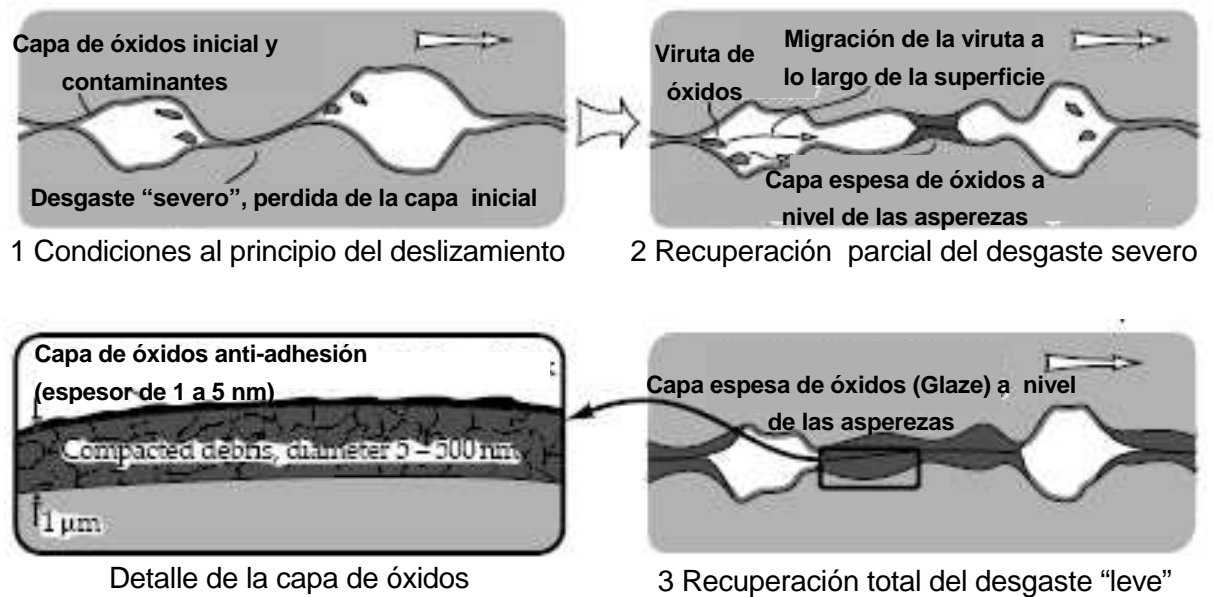


**Figura 1.13:** Mecanismo del desgaste por oxidación a velocidades altas de deslizamiento [7]





El desgaste a velocidades bajas de deslizamiento forma fácilmente viruta que consiste en la mezcla de óxidos y de metales. Las partículas de desgaste se forman y deforman sucesivamente lo que crea de manera continua una superficie metálica que se puede oxidar en el oxígeno atmosférico. La variación del coeficiente de fricción con la distancia de deslizamiento depende de la dispersión de las capas de óxidos en la superficie. El coeficiente de fricción disminuye de un valor elevado a un valor más moderado cuando las capas de óxidos recubren casi completamente la superficie desgastada.



**Figura 1.14:** Mecanismo del desgaste por oxidación a velocidades bajas de deslizamiento [9]



## 1.7 Estado del arte de la tribología en los aceros inoxidables

Existen pocos estudios sobre el comportamiento tribológico de los aceros inoxidables.

Smith estudio de forma detallada el deslizamiento del acero inoxidable austenítico 316 en el rango de temperatura 20 – 500°C [11]. Para ello fijó la carga a un valor constante de 8 N. Los diagramas de peso de la viruta en función de la distancia de deslizamiento mostraron la presencia de una zona de transición de desgaste de “severo” a “medio” para las temperaturas ambiente y de 300°C. Las otras temperaturas no mostraron dicha zona de transición pero se observó que la tasa de desgaste se ve disminuida al aumentar la temperatura. De hecho, el comportamiento del acero inoxidable austenítico 316 en deslizamiento en el aire cambia a partir de una temperatura de 300°C. A 300°C, la superficie desgastada presentó una capa de óxidos de 6 µm de espesor, característica de un desgaste “medio”. Por encima de 300°C, la rugosidad de la superficie desgastada aumenta a lo largo del recorrido. Esto produce un desplazamiento del material hacia el exterior de la pista y la generación de viruta lo que explica la tasa de desgaste “severa” a estas temperaturas.

Además Smith encontró que la oxidación de superficie depende mucho de la carga aplicada. En otro estudio realizado [12], determinó la influencia de la carga sobre el deslizamiento del acero inoxidable austenítico 316 a temperatura ambiente. Para ello, hizo variar la carga en un rango desde 0,5 hasta 90 N. Los diagramas de la tasa de desgaste en función de la carga aplicada presentaron una zona de transición. Por encima de 40 N, la carga no influía sobre los diagramas de volumen desgastado en función de la distancia recorrida y la tasa de desgaste fue “severa”. Por debajo de 45 N, después de un periodo de desgaste “severo” aparecía una zona de transición donde la tasa de desgaste disminuyó de 5 a 10 veces. Smith interpretó esta transición teniendo en cuenta el aumento de las interacciones elásticas entre las rugosidades en contacto.

Después de haber determinado que la temperatura y la carga aplicada juegan un papel importante sobre el desgaste del deslizamiento del acero 316, el propio Smith investigó el efecto de la velocidad de deslizamiento y de la oxidación de la superficie a cargas bajas [13]. Para hacerlo, utilizó un ensayo de “pin-on-disk” fijando la carga a 8 N y variando la velocidad entre 0,018 y 0,072 m/s. Para determinar la cinética del desgaste, realizó ensayos hasta distancias de 20000 m. Los diagramas de volumen de desgaste en función de la distancia recorrida mostraron una transición a cada velocidad estudiada. La distancia en la cual aparece la zona de transición aumentaba con la velocidad de deslizamiento. Sin embargo, se observó que el tiempo necesario para que ocurriese la transición no dependía de la velocidad de deslizamiento. La transición de un desgaste “severo” a un desgaste “medio” se caracterizó por la aparición de una fase de color marrón a nivel de la superficie



desgastada y en la viruta. Smith determinó que los efectos de la oxidación podían explicarla transición ya que provocan un endurecimiento de las rugosidades en contacto que permite aguantar las capas de óxidos.

Farias y colaboradores han estudiado la influencia de la carga aplicada y de la velocidad de deslizamiento sobre el deslizamiento no lubricado de los aceros inoxidables austeníticos 304 y 316 [14]. Los ensayos de “pin-on-disk” se han realizado para cargas desde 6 hasta 20 N y velocidades desde 0,07 m/s hasta 0,81 m/s. Se observó para cada ensayo, que el mecanismo de desgaste dominante fue la deformación plástica. Además, se mostró que una oxidación de la superficie ocurría en condiciones de carga moderada mientras que el desgaste por adhesión predominaba en condiciones de carga importante. El análisis estadístico de los resultados permitió a Farias y sus colaboradores determinar que la tasa de desgaste dependía mucho de la interacción de la carga y de la velocidad de deslizamiento.

Straffellini y colaboradores han estudiado el papel de la variación de velocidad de deslizamiento comparando el deslizamiento no lubricado de los aceros austenítico 304 L y acero inoxidable dúplex 2205 [15]. La evolución del desgaste se caracterizó por la existencia de una zona de transición. El acero inoxidable dúplex 2205 fue elegido para establecer si puede presentar un mejor comportamiento en deslizamiento que los aceros austeníticos dado que tiene mejor dureza. Los ensayos se realizaron hasta una distancia de 5000 m a velocidades comprendidas entre 0,2 y 1,2 m/s. Se observó una zona de transición, pasando de un desgaste de delaminación a la tribo-oxidación con una disminución de la tasa de desgaste. Esta zona de transición aumenta con el aumento de velocidad de deslizamiento. La transición se ha observado mucho más para el acero 304 L. Interpretaron las razones de esta transición teniendo en cuenta la teoría del deslizamiento basada en la formación y eliminación de la capa de óxidos debido a la deformación plástica que tenía lugar por debajo de la superficie de contacto. Esta interpretación les llevó hasta la conclusión de que la delaminación es el mecanismo de desgaste para los dos aceros para cada velocidad. La aparición de la zona de transición fue más complicada en el acero inoxidable dúplex 2205 que en el 304 L.



## 1.8 Objetivos del proyecto

Los diferentes trabajos presentados en la sección anterior ponen de manifiesto la poca información tribológica que se tiene de los aceros inoxidable dúplex. Por esta razón, el objetivo principal de este proyecto es de estudiar el comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205. Para ello, se llevaran a cabo los siguientes objetivos específicos:

- ✚ Caracterizar metalográficamente el acero inoxidable dúplex 2205.
- ✚ Determinar las propiedades necesarias para realizar el estudio como la dureza, la densidad y el perfil de rugosidad.
- ✚ Realizar los ensayos de tribología mediante la técnica de “pin-on-disk”.
- ✚ Determinar la cinética del desgaste realizando ensayos para diferentes recorridos a velocidad baja, media y alta.
- ✚ Analizar los tipos y mecanismos de desgaste mediante equipos complementarios como el MEB, el microdurometro y el rugosimetro.



## 2. Procedimiento experimental

La metodología utilizada en este proyecto consta de cuatro partes que tienen por objetivo determinar la cinética del desgaste y los tipos de desgaste que intervienen durante los ensayos tribológicos. Inicialmente, se presenta el material estudiado y su caracterización metalográfica. Seguidamente, se determinan algunas propiedades como la dureza, la densidad y la rugosidad superficial de las probetas de acero inoxidable dúplex 2205. Luego, se explica el procedimiento utilizado para realizar los ensayos de “pin-on-disk”. Esta metodología se acaba con la presentación del método de observación de las superficies desgastadas.

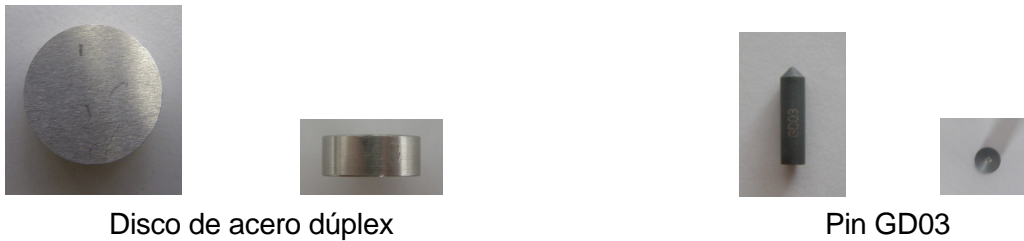
### 2.1. Materiales

Los aceros inoxidables dúplex, que se caracterizan por cantidades más o menos similares de austenita y de ferrita, combinan las mejores características de los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos. Hoy en día, son muy utilizados en las maquinas de la industria del papel, en los recipientes bajo presión, como puede ser el caso de las bombas, en las tuberías, y también en aplicaciones de reactores y de propulsores en aplicaciones marinas. La selección de estos aceros se basa en su alta resistencia y tenacidad asociadas a unas propiedades térmicas y anticorrosivas excelentes. En la tabla 2.1 se muestra la composición química del acero inoxidable dúplex 2205.

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N
0,023 %	1,55 %	0,026 %	0,006 %	0,450 %	22,62 %	5,92 %	3,02 %	0,158 %

**Tabla 2.1:** Composición química (% en peso) del acero Dúplex 2205





**Figura 2.1:** Presentación de los materiales utilizados para los ensayos tribológicos

A partir de una barra de acero inoxidable dúplex 2205, se han obtenido 25 probetas de este acero en forma de disco. Los discos tienen un diámetro de 20 mm por un espesor de 8 mm. En este estudio, el pin de metal duro GD03 utilizado tiene una dureza Vickers HV 30 de 20 GPa [16]. El pin tiene una altura de 16 mm, un diámetro de 4 mm y un radio de curvatura de 0,5 mm. Estos materiales serán utilizados para realizar los ensayos de “pin-on-disk”.

## 2.2. Caracterización metalográfica del acero dúplex 2205

La caracterización metalográfica del acero inoxidable dúplex 2205 se ha realizado mediante la técnica de microscopia óptica, la cual permite observar la morfología y la distribución de fases. Para ello, se han realizado los siguientes pasos:

- ✚ Desbaste
- ✚ Pulido
- ✚ Limpieza
- ✚ Ataque químico
- ✚ Microscopia óptica

### ➤ Desbaste

El desbaste se ha llevado a cabo por abrasión con papel de carburo de Silicio de diferente tamaño de grano (120, 240, 400, 600 y 1200) utilizando agua como elemento dispersante. El agua tiene por objeto refrigerar y barrer de la superficie las partículas de material tanto de la muestra como del abrasivo. Para pasar de un papel a otro, se debe obtener una superficie plana, uniforme y las rayas deben estar en una misma dirección.



### ➤ Pulido

Para pulir las probetas desbastadas, se utilizan paños de tiercopelo con suspensiones de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Las partículas de alumina tienen un diámetro de 6 micras en primer lugar y después pasamos a partículas de 1 micra.

### ➤ Limpieza

La limpieza de la probeta se realiza en un baño de ultrasonidos y permite eliminar las impurezas presentes en la superficie de las probetas. La metodología utilizada es la siguiente:

Paso 1: Colocar la probeta en acetona dentro de un recipiente.

Paso 2: Poner el recipiente dentro del baño de ultrasonidos durante 5 minutos.

Paso 3: Sacar la muestra antes del final de la parada del baño de ultrasonidos para que no se vuelvan a depositar las impurezas sobre la probeta.

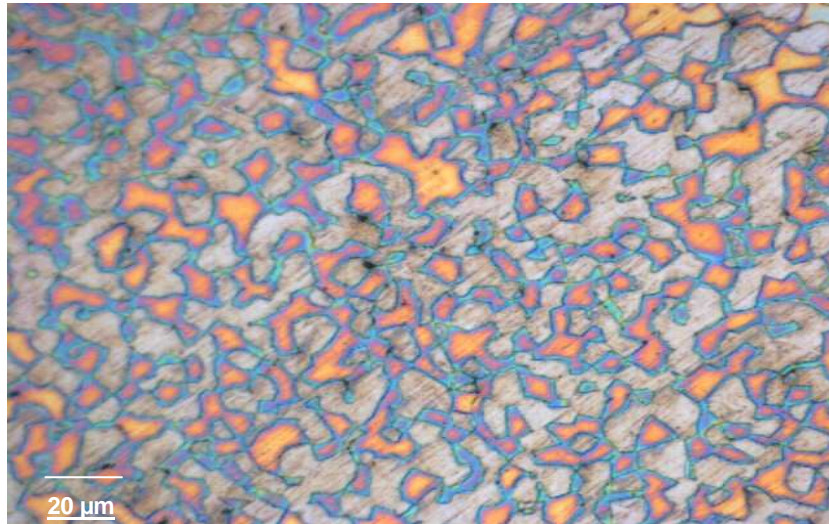
Una vez finalizado este proceso, la probeta está preparada para realizar el ataque químico.

### ➤ Ataque químico

Este procedimiento se realiza sumergiendo la muestra metálica pulida en una solución de sosa cáustica al 15 % que ataca la superficie con un voltaje de 4,5 V durante 3 segundos [17]. Como los cristales de los aceros estudiados tienen distintas orientaciones, los cristales adyacentes se disuelven por la solución de ataque a diferentes profundidades, produciendo el efecto del altiplano. Después del ataque, las interacciones de los límites de grano atacados en la superficie quedan marcados por una red de escarpaduras poco profundas. Estas superficies casi verticales no reflejan la luz en las lentes objetivos de un microscopio en la misma forma que las superficies horizontales y formas de los cristales que quedan entre ellos. Como resultado, se observará la posición de los límites de los cristales y la presencia de las diferentes fases. Se han seleccionado dos probetas para realizar el ataque químico. Mediante un microscopio óptico ha sido posible observar las dos fases distintas después del ataque químico. La Figura 2.2 presenta la microestructura de una probeta atacada. En esta foto, se observa el ataque de la ferrita lo que permite evaluar la proporción de cada fase.



Una vez realizado el ataque, el análisis de 10 fotos por probeta con un microscopio óptico es útil para obtener un promedio significativo de las proporciones de fases. La metodología relativa al uso del microscopio óptico se explica en el apartado Microscopia óptica.



**Figura 2.2:** Revelación de la microestructura de una probeta después del ataque químico

### ➤ Microscopia óptica

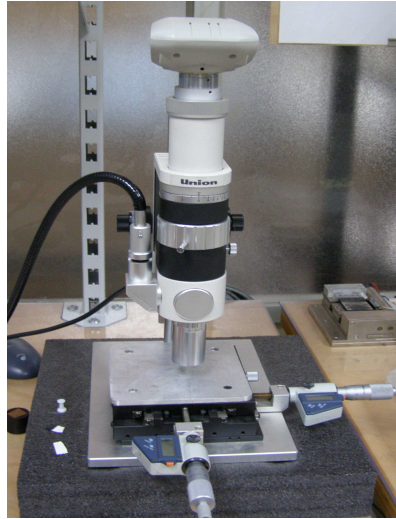
La microscopia óptica se ha utilizado para caracterizar la estructura de la barra de acero inoxidable dúplex 2205 revelando los bordes de grano, los bordes de fase y la presencia de inclusiones. La observación de la microestructura empieza con el uso de la lupa al aumento más bajo hasta identificar la microestructura para posteriormente incrementar el aumento de la lente hasta obtener una imagen representativa de las fases presentes en la probeta.

La lupa incluye una fuente de iluminación de alta intensidad, un microscopio y una cámara que permite visualizar la micrografía en la pantalla de un ordenador. El sistema de iluminación consiste en la lámpara, unas lentillas, unos filtros y unos diafragmas que se sitúan a lo largo del camino de la luz, es decir entre la fuente de luz y la muestra. El control de estos componentes permite conseguir una iluminación óptima de la probeta a observar. Además, la luz se puede ajustar en intensidad, color y polarización. A partir de diez fotografías para cada probeta, y con la ayuda de un programa analizador de imágenes, se





obtienen las áreas de fases de austenita y de ferrita teniendo en cuenta la calibración del tamaño de la fotografía.



**Figura 2.3:** Fotografía del microscopio óptico utilizado

### 2.3. Medición de la dureza

El termino “Dureza” está definido en la industria como la habilidad que tiene un material a resistir una indentación o una deformación cuando está en contacto con un indentador bajo carga. Un ensayo de dureza consiste en la presión de un indentador de geometría y de propiedades mecánicas conocidas sobre el material a ensayar. Ya que el indentador presiona el material, la dureza puede ser vista como la habilidad de un material a resistir cargas compresivas. Los diferentes tipos de indentador son: esféricos (ensayo Brinell), piramidales (ensayos Vickers y Knoop) o cónicos (ensayo Rockwell). En este proyecto, los indentadores utilizados para obtener los valores de macrodurezas y de microdurezas son los Vickers. En los ensayos de dureza Vickers, el valor de dureza corresponde en la carga aguantada por unidad de área de la indentación. El ensayo de dureza es quizás el método más simple y barato para caracterizar mecánicamente un material, dado que no requiere una preparación minuciosa de la muestra y que es un ensayo rápido.

Los ensayos de dureza pueden también clasificarse basándose en el valor de la carga de indentación. Se pueden realizar macrodurezas, microdurezas, y últimamente ensayos de nanodureza.



Para la determinación de la dureza media del acero inoxidable dúplex 2205, se ha efectuado un ensayo de macrodureza Vickers. El rango de carga utilizado para este tipo de ensayo se sitúa entre 1 kg y 120 kg. En cambio, los ensayos de microdureza Vickers han sido los utilizados para realizar el perfil de dureza a lo largo de la pista formada por el paso del pin sobre el disco. En este tipo de ensayo, se utilizan cargas más bajas; de 1 g a 1 kg.



**Figura 2.4:** Fotografía del durómetro Franck utilizado para medir la dureza Vickers

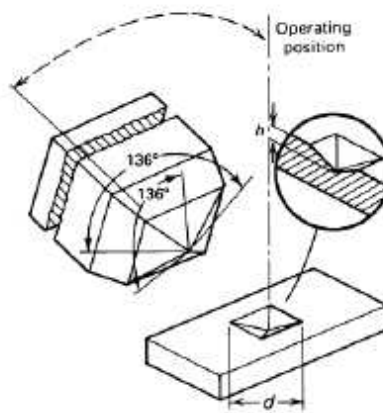
Como ha sido explicado, el principio del ensayo Vickers consiste en un ensayo simple de indentación para determinar la dureza de una grande variedad de materiales. El ensayo consiste en la aplicación de una carga constante durante un tiempo específico. En este caso, el indentador de diamante de base piramidal presiona la superficie del acero dúplex 2205 con una carga de 10 kg. Cuando las fuerzas alcanzan la condición de equilibrio, la fuerza queda aplicada durante 10 segundos y luego la presión del indentador se retira. Para este estudio, se han seleccionado tres probetas a las que se le han realizado tres indentaciones con un durómetro Franck como el que se muestra en la figura 2.4. Las diagonales resultantes de la indentación que no se han podido recuperar elásticamente se miden para obtener un valor promedio en milímetros para las tres probetas ensayadas. La medida de las longitudes se hace con ayuda de un microscopio óptico y permite calcular el valor de dureza media Vickers HV 10. El valor de dureza Vickers está relacionado con la carga aplicada y el área de la indentación no recuperada.



El indentador Vickers tiene ángulos de  $136^\circ$  como se puede ver en la figura 2.5 y el valor de dureza HV 10 se calcula utilizando la formula siguiente:

$$HV = \frac{2P \sin(136/2)}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde P es la carga de indentación en kg y d es la diagonal principal de indentación en mm.



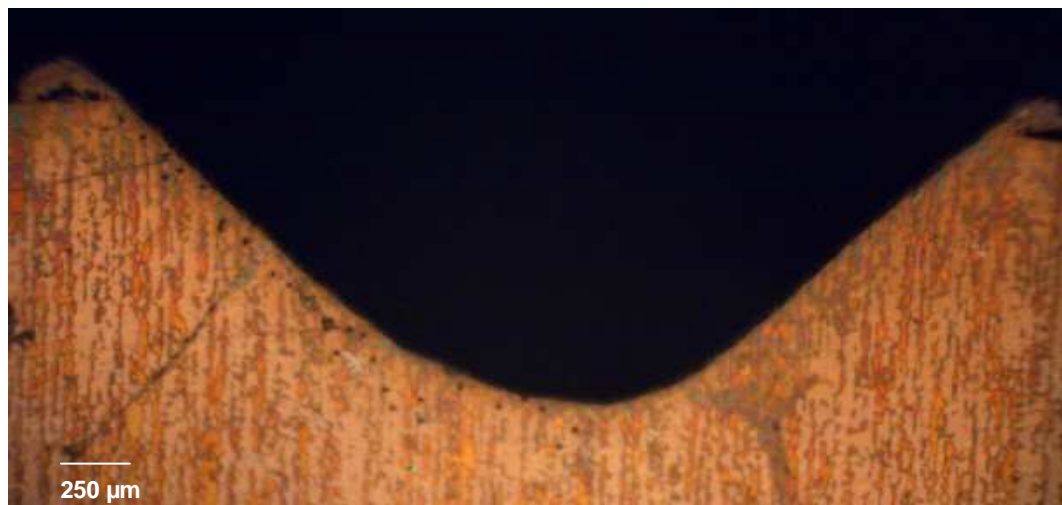
**Figura 2.5:** Indentador de diamante en forma de pirámide Vickers y la indentación resultante del material

Otro ensayo de dureza se ha realizado después de los ensayos de “pin-on-disk”. Este ensayo consiste en realizar el perfil de dureza a lo largo de la pista desgastada del disco.

Los ensayos han sido realizados con un microdurometro Akashi MVK-HO aplicando una carga de 25 g. La realización del perfil de dureza es posible cortando los discos, previamente deformados por el pin, por la sección transversal. El pulido y el ataque con sosa cáustica al 15 % se ha realizado para identificar la fase del acero inoxidable dúplex que se indenta. Los diferentes valores de dureza obtenidos corresponden a la dureza de la fase de ferrita.

Para diferentes velocidades de deslizamiento analizadas y para distintos recorridos, se ha medido la dureza a aproximadamente 50 micras de la pista a lo largo de esta como se muestra en la figura 2.6.





**Figura 2.6:** Microfotografía de una probeta indentada para determinar el perfil de dureza

## 2.4. Medición de la densidad

Para conseguir un valor medio de densidad de las probetas, se ha utilizado una báscula de alta precisión basada en el principio de Arquímedes.

La densidad de las probetas se determina con ayuda de agua destilada cuya densidad  $\rho_0$  es conocida. La muestra se pesa una vez en aire  $m_A$  y luego sumergida en el líquido  $m_B$ . A partir de las dos pesadas se puede calcular la densidad  $\rho$  utilizando las ecuaciones siguientes.



$$\text{Densidad } \rho = (m_A / (m_A - m_B)) \times (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\text{Volumen } V = \alpha \times (m_A - m_B) / (\rho_0 - \rho_L) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

$\rho$  = Densidad de la muestra

$\rho_0$  = Densidad del agua destilada

$\rho_L$  = Densidad del aire = 0,0012 g/cm<sup>3</sup>

$m_A$  = Peso de la muestra en el aire

$m_B$  = Peso de la muestra en el líquido

$\alpha$  = Factor de corrección de la báscula = 0,99985

Nota: Los aceros son en general tan poco sensibles a las variaciones de temperatura que los cambios de densidad producidos son poco importantes. Sin embargo, dado que para determinar la densidad de sólidos según el principio de Arquímedes se trabaja con un líquido auxiliar, hay que tener en cuenta su temperatura.

## 2.5. Medición de la rugosidad superficial

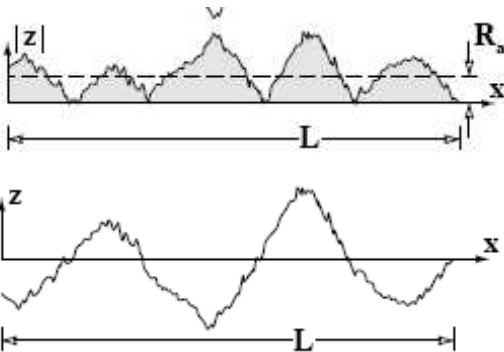
Tanto en aplicaciones industriales como en la vida cotidiana, el grado de rugosidad de las superficies es importante, ya que en algunos casos, se requieren rugosidad “altas” y en otros esta condición es indeseable.

Uno de los métodos más utilizados para determinar la rugosidad superficial se basa en la perfilometría lineal mediante un rugosímetro. El tratamiento estadístico de los datos permite determinar parámetros como la desviación media aritmética del perfil de rugosidad  $R_a$ , la altura máxima del perfil de rugosidad  $R_y$  y la desviación media cuadrática del perfil de rugosidad  $R_q$ .



$R_a$  y  $R_q$  se definen de la siguiente forma [7]:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z| dx$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2 dx}$$


Donde  $L$  es la longitud de muestra, y  $z$  es la altura del perfil de rugosidad a lo largo de la distancia  $x$ . El principio de operación de este equipo es simple: una fina punta en contacto con la superficie de la muestra a analizar realiza un barrido controlado en línea recta y las variaciones de alturas se convierten en señales eléctricas y se registran o se grafican.



**Figura 2.7:** Fotografía del perfilómetro utilizado para determinar los perfiles de rugosidad

En general los parámetros utilizados para cuantificar la rugosidad pueden interpretarse como parámetros propios de la distribución estadística de alturas del perfil o superficie bajo análisis. Antes y después de cada ensayo de “pin-on-disk”, se ha determinado el perfil de la superficie. Para obtener un buen promedio de estos valores se han realizado tres mediciones.



Para obtener la topografía de las superficies, se utiliza un procedimiento normalizado de trabajo que nos guía en cuanto a la manera de utilizar el rugosímetro *Surftest SV-500 de Mitutoyo* que se ve en la figura 2.8. Este rugosímetro tiene una punta palpadora de diamante de forma cónica (90°), con 5  $\mu\text{m}$  de diámetro de la punta, de resolución mínima 0,1  $\mu\text{m}$ .

El procedimiento utilizado se resume en los diferentes pasos:

Paso 1: Encender el rugosímetro y entrar al programa SURFPAK.

Paso 2: Colocar la probeta debajo de la punta del brazo del rugosímetro.

Paso 3: Bajar el rugosímetro hasta que la punta del brazo entre en contacto con la superficie y, fijar el cero de la medida.

Paso 4: Introducir los parámetros de medición: velocidad del brazo (0,1 mm/s), parámetro de sensibilidad ( $\lambda_c = 0,800 \text{ mm}$ ) y distancia recorrida (4 mm).

Paso 5: Realizar la medida.

Paso 6: Comprobar que el resultado de  $R_a$  cumple con la norma JIS B 0601 [18]. En caso contrario, modificar los parámetros de medición del paso 4 y repetir los pasos 5 y 6.

Paso 7: Realizar tres mediciones por cada probeta.

Paso 8: Guardar los resultados.

## 2.6. Ensayos de “pin-on-disk”

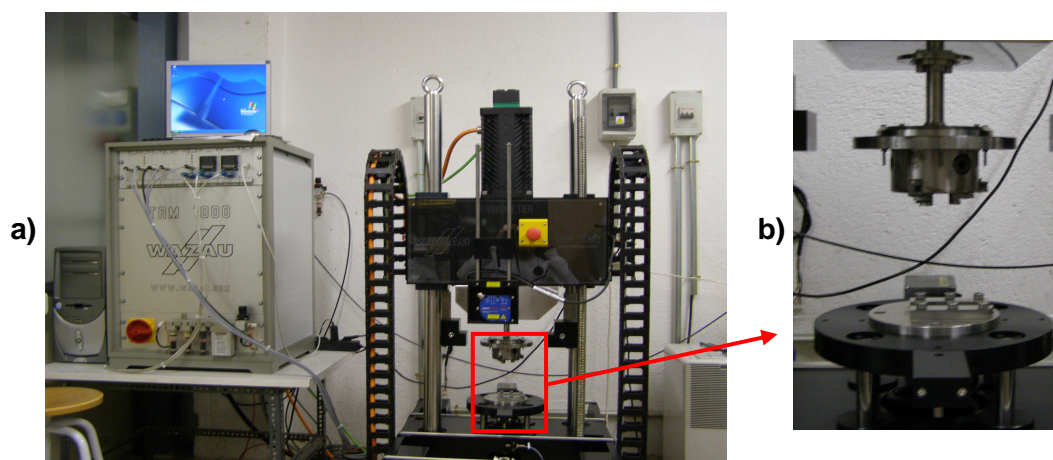
En esta parte, se describe el procedimiento que permite determinar el desgaste del acero dúplex 2205 durante los ensayos de “pin-on-disk”. Para efectuar un ensayo de “pin-on-disk”, hacen falta dos probetas; un pin y un disco. El pin GD03, con un radio de curvatura de 0,5 mm, está colocado perpendicularmente al disco. El pin desliza sobre la superficie del disco en un diámetro de 12 mm. El desgaste producido en un ensayo tribológico depende de varios factores como: la carga aplicada, la velocidad de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, el medio y las propiedades del material. Los ensayos de “pin-on-disk” se han realizado a temperatura ambiente sin lubricación a una carga de 5N en las condiciones estándares de temperatura y de humedad (20 °C y 55 % de humedad).





La variación de la velocidad de deslizamiento se realiza para determinar como afecta a los mecanismos de desgaste para diferentes recorridos. Las velocidades seleccionadas han sido: 0,2 m/s, 0,7 m/s y 1,2 m/s y las distancias recorridas han sido: 500 m, 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m y 5000 m).

El equipo utilizado para realizar los ensayos es el tribómetro TRM 1000 fabricado y distribuido por WAZAU GmbH. Este equipo se utiliza para la investigación y simulación de los procesos de fricción y desgaste por deslizamiento. En la figura 2.8 a), se observa una vista frontal del equipo.



**Figura 2.8:** Fotografía del tribómetro TRM 1000

En la figura 2.8 b), se puede observar como el disco se coloca en una portamuestra enganchado en un brazo que puede girar a diferentes velocidades. El contracuerpo, es decir el pin, se coloca debajo del disco en una portamuestra que permite variar el radio de la pista creada por la acción del pin sobre el disco. Además, el tribómetro cuenta con un sistema de adquisición de datos donde se registran la fuerza aplicada, la fuerza y el coeficiente de fricción, el torque y el desgaste lineal entre las superficies en contacto. Todo ello controlado desde un programa desarrollado por la misma casa llamado Tribocontrol.

El procedimiento utilizado para realizar los ensayos se resume en los siguientes pasos:

**Paso 1:** Se limpia la superficie de la probeta para eliminar el polvo o las impurezas. Para ello, se utiliza un baño de ultrasonidos durante un tiempo de 5 min.

**Paso 2:** El pin y el disco se pesan en la báscula antes y después de cada ensayo. La báscula tiene una sensibilidad de 0,0001 g.



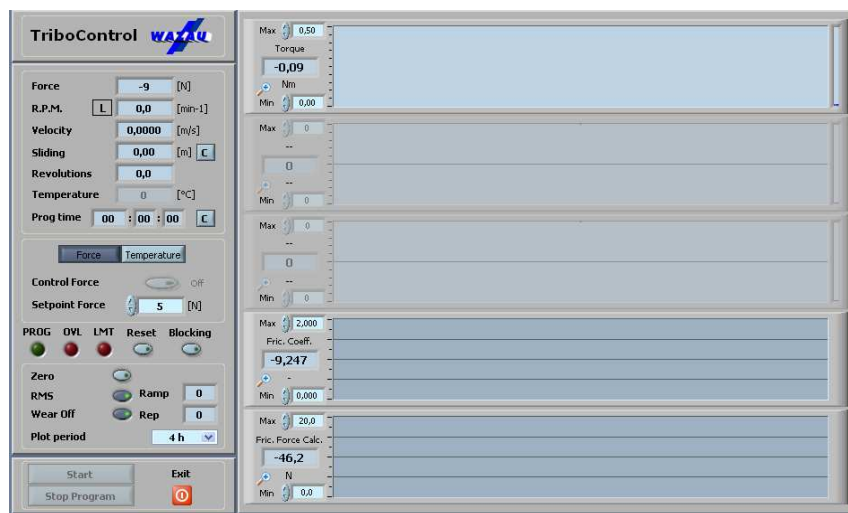


**Paso 3:** Se mide la rugosidad superficial de cada probeta.

**Paso 4:** Se montan el disco y el pin en el tribómetro. El disco se coloca en el brazo superior que gira a velocidad constante hasta una cierta distancia. El pin se coloca en un portapin fijo teniendo en cuenta el radio de la pista descrita sobre el acero (6 mm).

**Paso 5:** Se seleccionan los parámetros del ensayo en el programa TRIBOCONTROL: la carga a aplicar, la velocidad de deslizamiento, el radio de la pista circular y la distancia.

En la figura 2.9, se muestra una vista general del programa de control y adquisición TRIBOCONTROL.



**Figura 2.9:** Fotografía del programa Tribocontrol

## 2.7. Análisis de superficie mediante microscopia

La morfología de los mecanismos de desgaste es a veces muy compleja y puede indicar varios tipos en función de las características del desgaste. La pista formada durante los ensayos tribológicos contiene particularidades como extrusiones, agujeros, rayas finas, microgrietas...etc. Por este motivo, la microscopia es esencial en el estudio de los tipos de desgaste y sus mecanismos. El análisis microscópico de la superficie desgastada es un complemento imprescindible a la topografía. La presencia de particularidades en la pista, por ejemplo, ayuda a clasificar el tipo de desgaste. Esta clasificación requiere mucha experiencia de interpretación de las superficies desgastadas.



En investigación, la examinación de las pistas de desgaste es muy útil para determinar los mecanismos de desgaste. Esta investigación puede incluir el análisis de superficie, el análisis de la morfología de la viruta y la observación de la microestructura cerca de la superficie. En general, se utilizan varios tipos de microscopia como la microscopia óptica, la microscopia electrónica de barrido (MEB), la microscopia electrónica de transmisión (MET)...etc. Para el análisis de las superficies desgastadas y de la viruta recuperada, se han utilizado la microscopia óptica y la microscopia electrónica de barrido.

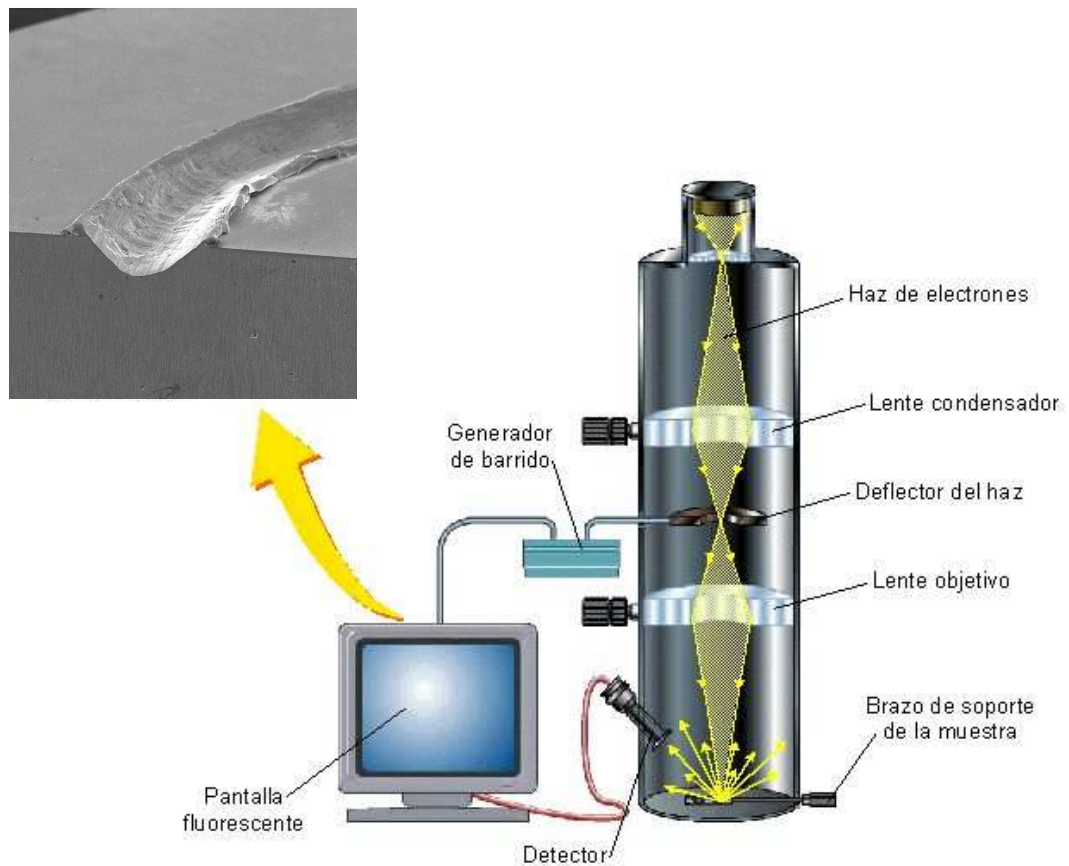
En primer lugar, la morfología macroscópica de una superficie desgastada ofrece información como el tamaño y la forma de la pista, pero también para tener una idea de la parte que necesita el uso de la microscopia.

El MEB es uno de los instrumentos más utilizados para investigar la microestructura de los materiales gracias a su gran profundidad de campo. Bajo el bombardeo de electrones, varias señales son generados como electrones secundarios, electrones dispersos, rayos x característicos,...etc. que pueden permitir a la caracterización de los materiales. El MEB ofrece posibilidades de formar una imagen fácilmente interpretable ya que revela claramente tanto imágenes de las secciones transversales pulidas y atacadas como imágenes de superficies rugosas y de partículas.

Los componentes principales de un MEB incluyen el generador de electrones, un generador de barrido, una columna que contiene las lentes magnéticas de electrones, los condensadores de lentes y un deflector del haz. La parte baja de la columna tiene unos detectores de electrones y el sistema de vacío necesario al paso de los electrones. La figura 2.10 presenta las partes principales de un MEB.

Los electrones son generados por emisión termoiónica o por un campo eléctrico. Luego, los electrones son acelerados hacia el espécimen. El MEB JMS 6400 de JEOL, dotado de un espectrómetro de dispersión de energía R – X, utiliza un filamento de tungsteno que juega el papel de cátodo para acelerar los electrones. El ánodo consiste en una pequeña apertura que deja pasar los electrones. El voltaje utilizado para acelerar los electrones es de 20 kV. Las lentes sirven para obtener el aumento deseado. Unas aperturas colocadas entre las lentes permiten limitar el diámetro del haz. El haz de electrones efectúa un barrido y así forma la imagen. El generador de electrones y la columna tienen que estar al vacío para evitar todo daño de la fuente de electrones y toda bajada del voltaje del generador de electrones. El vacío es también necesario para minimizar la dispersión de los electrones durante el pasaje del generador a la superficie de la muestra. El detector de electrones utilizado es el detector Everhart – Thornley que consiste en un equipo que, bajo bombardeo de electrones, produce fotones. Los fotones se convierten en señales eléctricas mediante un fotomultiplicador.





**Figura 2.10:** Presentación esquemática de las partes principales de un MEB

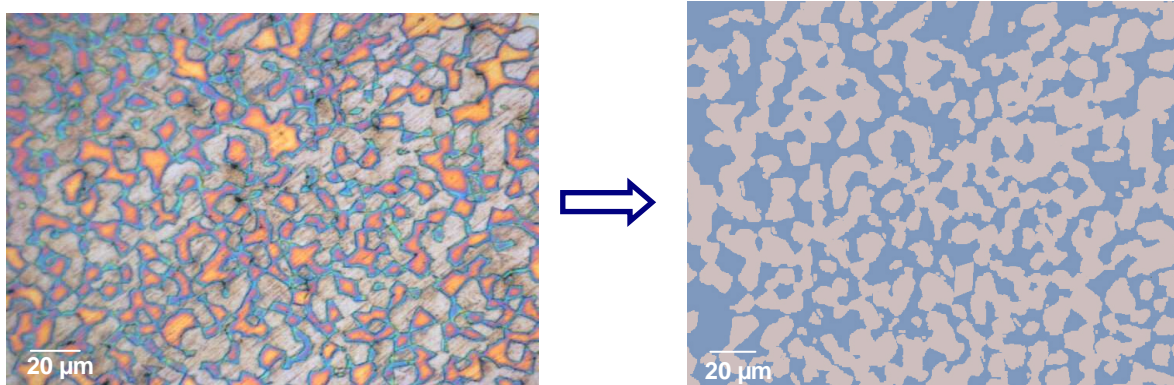
Además de los componentes principales de un MEB descritos antes, el MEB utilizado está equipado de un detector de energía dispersiva de rayos x. Este equipo permite el análisis químico cualitativo y cuantitativo de las probetas.



### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Caracterización metalográfica del acero inoxidable Dúplex 2205

Se ha podido caracterizar la microestructura del acero inoxidable dúplex 2205 utilizando un microscopio óptico que dispone de un analizador de imágenes marca *UNION*. Tal y como se ha explicado en la metodología experimental, el ataque químico revela la fase de ferrita que se colora en azul y naranja.



**Figura 3.1:** Microestructura del acero inoxidable dúplex 2205

Mediante, el analizador de imágenes se detectan todas las zonas del mismo color y contraste. De esta forma, se determina la relación de ferrita y de austenita utilizando un promedio de 20 fotos y el resultado obtenido ha sido:

**46 % de ferrita  $\alpha$  y 54 % de austenita  $\gamma$**



### 3.2. Dureza del acero inoxidable dúplex 2205

Después de realizada la caracterización microestructural del acero inoxidable dúplex 2205, se ha determinado su dureza media realizando ensayos de macrodureza Vickers a una carga de 10 kg. El valor de dureza Vickers se ha calculado a partir de diagonal de la huella. Su valor medio ha sido de 0,28 mm lo que da una dureza media Vickers **236 HV10**. Este valor de dureza es más grande que la dureza Vickers de los aceros inoxidables austeníticos AISI 304 y AISI 316 que tienen durezas de un orden de 180 HV10.

En la figura 3.2, se muestra una microfotografía de las indentaciones Vickers realizadas en el material.

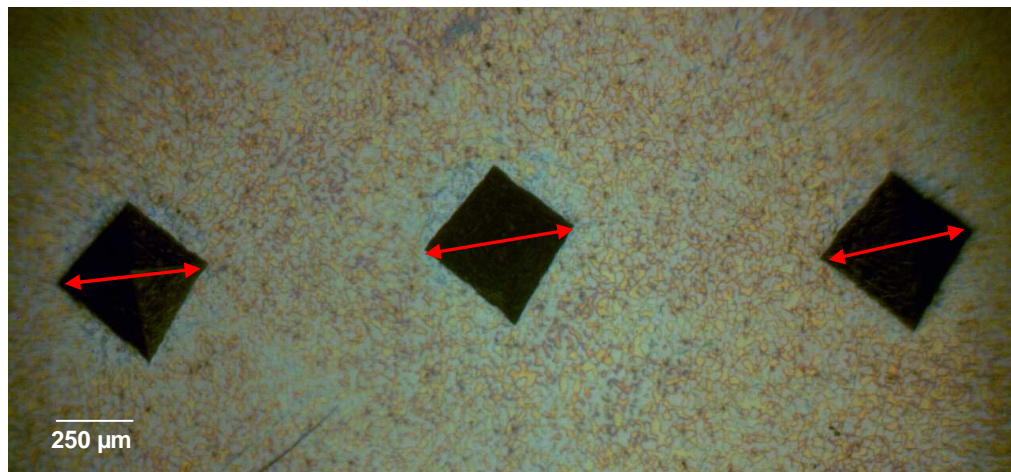


Figura 3.2: Microfotografía de tres indentaciones



### 3.3. Densidad del acero inoxidable dúplex 2205

La densidad se ha determinado utilizando tres probetas. En la tabla 3.1, se presentan los valores de peso en el aire  $m_a$  y de peso en el agua destilada. Aplicando la ecuación 2.1 se obtienen los valores de densidad.

Medidas de densidad	Peso en el aire $m_A$	Peso en el líquido $m_B$	Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )
Probeta 3	19,405	16,928	7,809
Probeta 6	19,449	16,967	7,812
Probeta 7	19,481	19,973	7,742

**Tabla 3.1:** Valores de densidad en tres probetas de acero inoxidable dúplex 2205

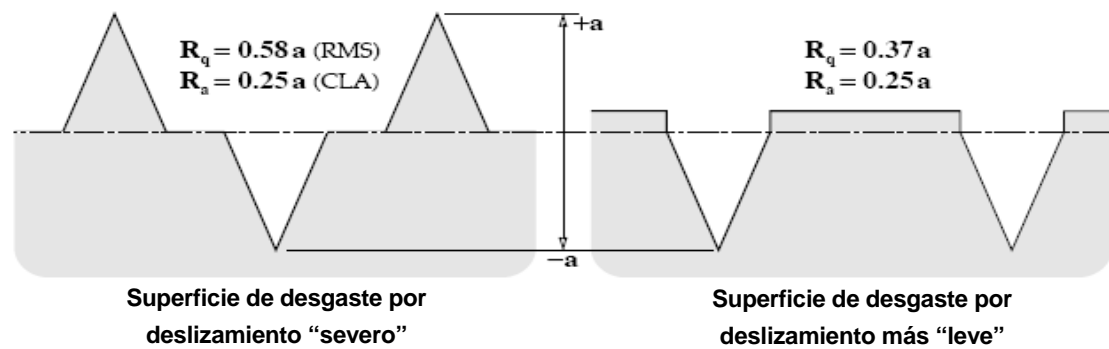
El valor calculado corresponde a **una densidad media  $\rho = 7,787 \text{ g/cm}^3$**

Este valor es similar a los valores de los aceros inoxidables austeníticos 304, 310 ( $7,9 \text{ g/cm}^3$ ) y 316 ( $8,0 \text{ g/cm}^3$ ).

### 3.4. Rugosidad superficial de los discos de acero inoxidable dúplex 2205

En todas las superficies existen defectos y distorsiones. Se ha demostrado que estas irregularidades microscópicas influyen en la fricción y el desgaste [7]. Por tanto, para intentar minimizar su influencia, se ha realizado una preparación superficial de las probetas. Los valores presentados corresponden a la desviación media aritmética del perfil de rugosidad  $R_a$  y a la desviación media cuadrática del perfil de rugosidad  $R_q$ . El efecto de los picos y valles se caracteriza por un valor medio de la rugosidad superficial  $R_a$ . Sin embargo, el inconveniente del parámetro  $R_a$  es que puede presentar valores idénticos para superficies que presentan características diferentes tal y como se muestra en la figura 3.3.





**Figura 3.3:** Caracterización del interés de  $R_q$  [7]

El parámetro  $R_q$  es más representativo que el parámetro  $R_a$  ya que  $R_q$  corresponde a la norma de  $R_a$ . La tabla 3.3 presenta los valores de desviación media aritmética y cuadrática del perfil de rugosidad de las probetas utilizadas antes de los ensayos tribológicos para las tres velocidades de deslizamiento estudiadas. Como se observa en la tabla 3.3, los valores de  $R_a$  se sitúan entre 0,20 y 0,48  $\mu\text{m}$  mientras que los de  $R_q$  se sitúan entre 0,24 y 0,45  $\mu\text{m}$ . En la figura 3.4, se muestra el perfil de rugosidad de una probeta antes del ensayo de “pin-on-disk”.

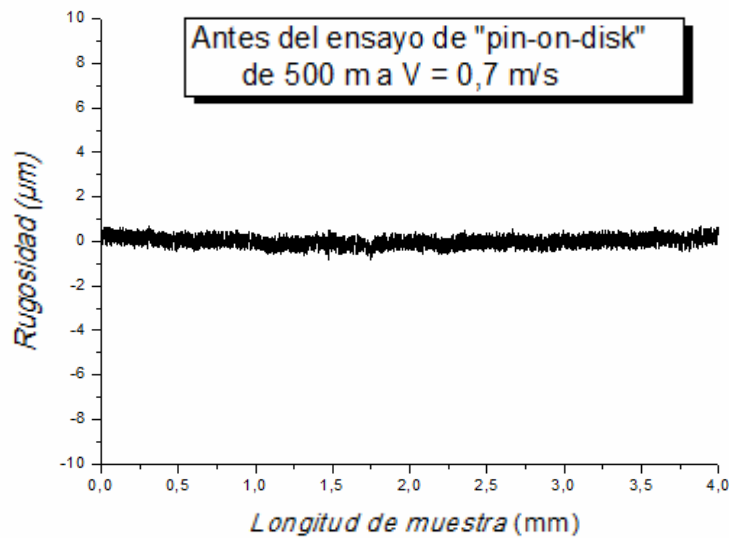
Basándose en el valor de carga aplicada  $N$  (5N) y las dimensiones del pin, se utiliza la ecuación  $P_n = N/A_n$  para calcular una presión nominal de 6,36 MPa.

Probeta	V = 0,2 m/s		Probeta	V = 0,7 m/s		Probeta	V = 1,2 m/s	
	$R_a$	$R_q$		$R_a$	$R_q$		$R_a$	$R_q$
2B	$R_a = 0,43$	$R_q = 0,36$	24A	$R_a = 0,20$	$R_q = 0,24$	21B	$R_a = 0,23$	$R_q = 0,27$
2A	$R_a = 0,30$	$R_q = 0,35$	18A	$R_a = 0,29$	$R_q = 0,34$	19A	$R_a = 0,23$	$R_q = 0,28$
3B	$R_a = 0,48$	$R_q = 0,33$	23A	$R_a = 0,25$	$R_q = 0,30$	20B	$R_a = 0,33$	$R_q = 0,39$
5B	$R_a = 0,30$	$R_q = 0,37$	23B	$R_a = 0,29$	$R_q = 0,36$	19B	$R_a = 0,36$	$R_q = 0,45$
4B	$R_a = 0,24$	$R_q = 0,29$	22B	$R_a = 0,21$	$R_q = 0,25$	18B	$R_a = 0,22$	$R_q = 0,27$
7A	$R_a = 0,34$	$R_q = 0,42$	21A	$R_a = 0,27$	$R_q = 0,37$	17B	$R_a = 0,31$	$R_q = 0,37$

**Tabla 3.3:** Valores de desviación media aritmética  $R_a$  y cuadrática  $R_q$  antes de los ensayos tribológicos







**Figura 3.4:** Perfil de rugosidad de la superficie de la probeta 12A

### 3.5. Comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205

Como se ha comentado anteriormente, los ensayos de "pin-on-disk" se han realizado a una carga de 5N y un radio de 6 mm para diferentes distancias de deslizamiento: 500 m, 1000 m, 2000 m, 3000 m, 4000 m y 5000 m.

#### 3.5.1. Cinética del desgaste

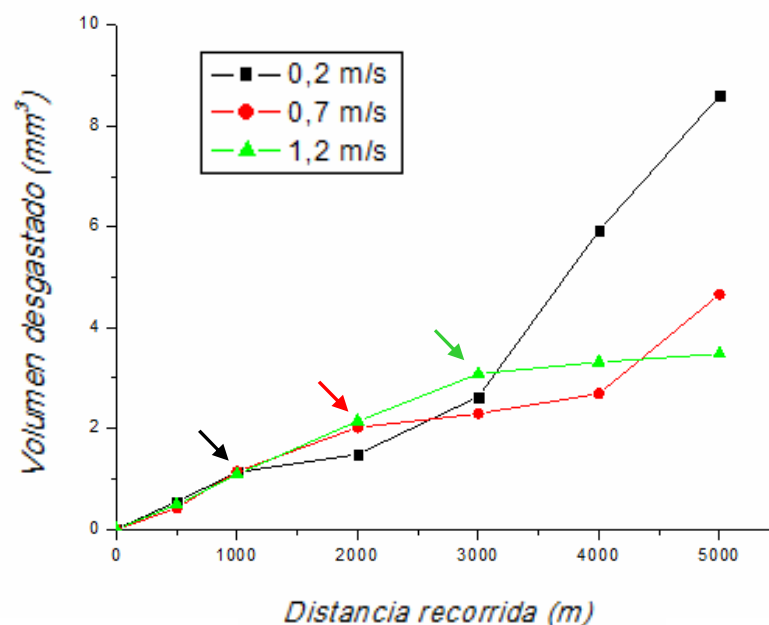
Los diagramas de cinética de desgaste del acero inoxidable dúplex 2205 se muestran en la figura 3.5. En dicha figura, se puede observar como los diagramas presentan perfiles diferentes en función de la velocidad. Se puede ver que a partir de 3000 m de distancia recorrida, la velocidad de 1,2 m/s disminuye el volumen de desgaste. Sin embargo, en los otros dos casos, es decir para 0,2 y 0,7 m/s, aumenta. A la velocidad de 0,2 m/s, el volumen desgastado después de 5000 m es de  $8,59 \text{ mm}^3$ , a 0,7 m/s, es de  $4,66 \text{ mm}^3$  y a 1,2 m/s, es de  $3,48 \text{ mm}^3$ .





Además, se aprecia como a partir de una cierta distancia recorrida, los diagramas ponen de manifiesto un cambio en la tendencia del desgaste. Esta zona, definida como zona de transición, depende de la velocidad de deslizamiento.

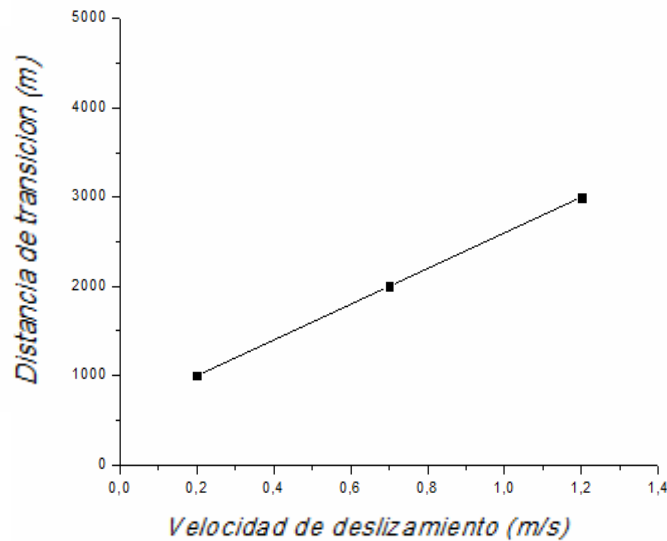
Así, para una velocidad de deslizamiento de 0,2 m/s la zona de transición se inicia a una distancia de 1000 m y finaliza a los 2000 m donde se ve claramente que el volumen desgastado vuelve a aumentar. Para la velocidad de 0,7 m/s, la zona de transición se presenta entre 2000 m y 4000 m mientras que en el caso de 1,2 m/s, tiene lugar a partir de 3000 m hasta la distancia máxima recorrida de 5000 m.



**Figura 3.5:** Diagramas de cinética de desgaste para el acero inoxidable dúplex 2205

En la figura 3.6, se muestra el inicio de la zona de transición en función de la velocidad de deslizamiento. En la figura se observa que al aumentar la velocidad de deslizamiento, la distancia en la cual aparece la zona de transición aumenta igualmente.



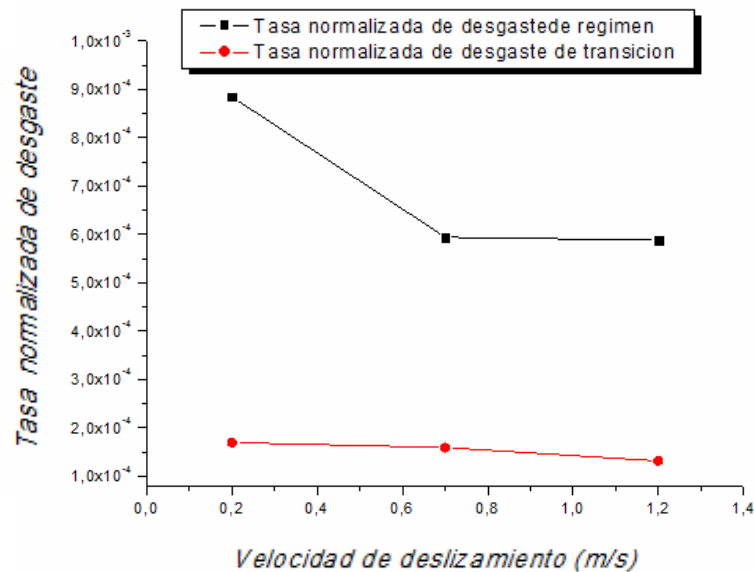


**Figura 3.6:** Distancia a la cual se inicia la zona de transición en función de la velocidad de deslizamiento

La figura 3.7 presenta los valores de la tasa normalizada de desgaste para las tres velocidades de deslizamiento. Para calcular la tasa de desgaste de régimen, se ha tenido en cuenta la tasa de desgaste inicial y la tasa de desgaste obtenida después de la zona de transición.

La tasa normalizada de desgaste se obtiene multiplicando la tasa de desgaste ( $\text{cm}^3/\text{cm}$ ) por la dureza ( $\text{N}/\text{cm}^2$ ) y dividiendo por la carga (N). El valor obtenido es un número adimensional. Los valores de tasa de desgaste de régimen se sitúan en el rango desde  $5,87 \cdot 10^{-4}$  hasta  $8,84 \cdot 10^{-4}$  mientras que los valores de tasa de desgaste de transición están en el rango desde  $1,31 \cdot 10^{-4}$  hasta  $1,68 \cdot 10^{-4}$ . Los valores de tasa normalizada de desgaste de régimen corresponden a un desgaste “severo”. En cambio, la zona de transición se caracteriza por un desgaste “medio” ya que la tasa de desgaste normalizada no supera el valor de  $3,5 \cdot 10^{-4}$  [19]. Además, se puede observar en la figura 3.7 como para la velocidad de 0,2 m/s la tasa de desgaste normalizada en la zona de transición es cinco veces menor que la tasa de desgaste normalizada de régimen. Para las otras dos velocidades de deslizamiento, la tasa normalizada de desgaste en la zona de transición disminuye también.





**Figura 3.7:** Tasa normalizada de desgaste en función de la velocidad de deslizamiento para las zonas de régimen y de transición

### 3.5.2. Evolución de la fricción y de la temperatura

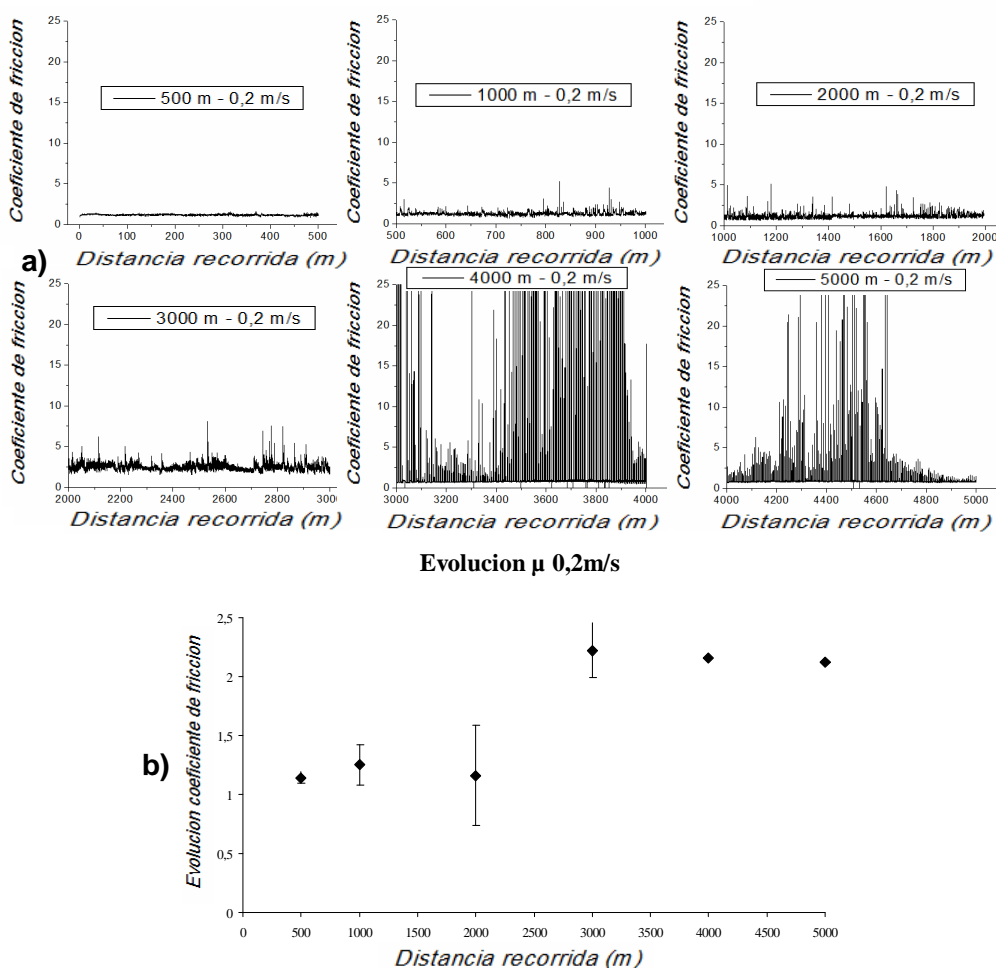
Las figuras 3.8, 3.9 y 3.10 presentan la evolución de los coeficientes de fricción  $\mu_k$  a lo largo de la distancia recorrida para las velocidades de deslizamiento de 0,2, 0,7 y 1,2 m/s. Para las diferentes distancias recorridas, se ha calculado un promedio del coeficiente de fricción. Este promedio sobre la distancia nos puede ayudar a confirmar las zonas de transición detectadas en los diagramas de cinética de desgaste y en la tasa normalizada de desgaste.

Para los ensayos realizados a la velocidad de 0,2 m/s (Figura 3.8), se puede apreciar la evolución del coeficiente de fricción  $\mu_k$  durante la distancia recorrida. En el ensayo realizado para una distancia de 500m, se observa que el valor medio del coeficiente de fricción es de 1,14 (Figura 3.8 b)). Para 1000 m, el valor medio es de 1,25. Además, se observa como a partir de 800 m, el coeficiente de fricción sufre pequeñas oscilaciones. El volumen desgastado es de aproximadamente  $1,13 \text{ mm}^3$  ( $1,13 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{cm}$ ). Posteriormente, las oscilaciones se acentúan hasta 2000 m. Sin embargo, este intervalo de distancia se caracteriza por un coeficiente de fricción de 1,16 y una tasa normalizada de desgaste de  $1,69 \cdot 10^{-4}$ . Este valor nos indica la presencia de una transición del desgaste. Esta transición es muy marcada en el diagrama de cinética de desgaste. El valor del coeficiente de fricción  $\mu_k$  es de 1,16 (Figura 3.8 b)), pero no se puede observar un gran cambio.



Como se ha visto, la transición es más marcada para la tasa de desgaste que para el coeficiente de fricción. Esto puede provenir de las oscilaciones en el coeficiente de fricción  $\mu_k$  observadas durante esta distancia de deslizamiento. El intervalo de 2000 a 3000 m muestra que las oscilaciones continúan ocurriendo más frecuentemente. Estas oscilaciones del coeficiente de fricción aumentan el coeficiente de fricción medio hasta 2,2 para este intervalo. La tasa normalizada de desgaste en este periodo es de  $5,38 \cdot 10^{-4}$ .

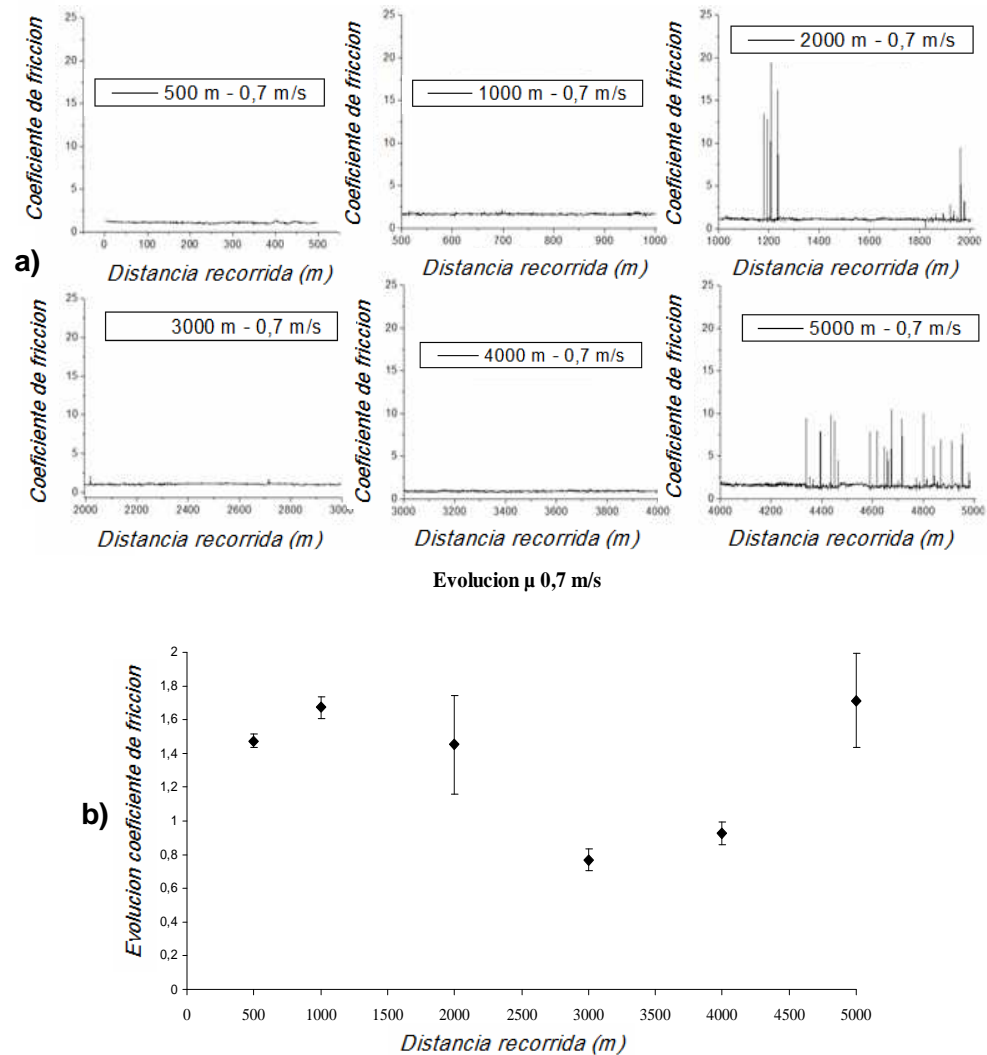
Durante los últimos 2000 m, las oscilaciones se amplifican. El coeficiente de fricción medio sobre los 2000 últimos metros es de 2,14 y la tasa normalizada de desgaste es de  $14,08 \cdot 10^{-4}$ .



**Figura 3.8:** Evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia recorrida para la velocidad de 0,2 m/s



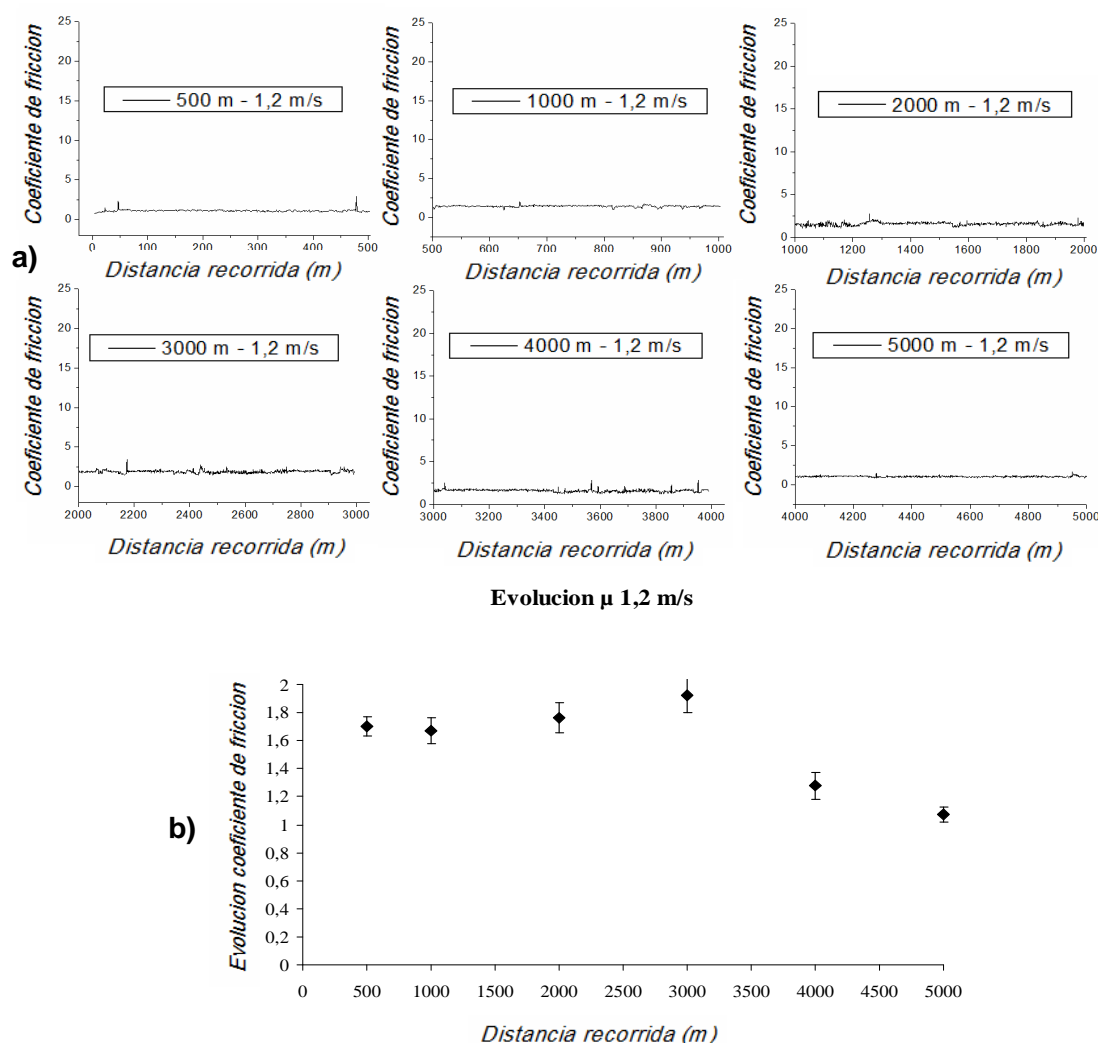
En la figura 3.9 que presenta los resultados del coeficiente de fricción para la velocidad de 0,7 m/s. Se observa una zona de transición a la distancia de 2000 m. Los primeros 2000 m presentan un coeficiente de fricción medio de 1,51 y una tasa normalizada de desgaste de  $4,97 \cdot 10^{-4}$ . Luego, entre 2000 m y 3000 m, el coeficiente de fricción y la tasa normalizada de desgaste disminuyen hasta 0,77 y  $1,31 \cdot 10^{-4}$  respectivamente.



**Figura 3.9:** Evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia recorrida para la velocidad de 0,7 m/s



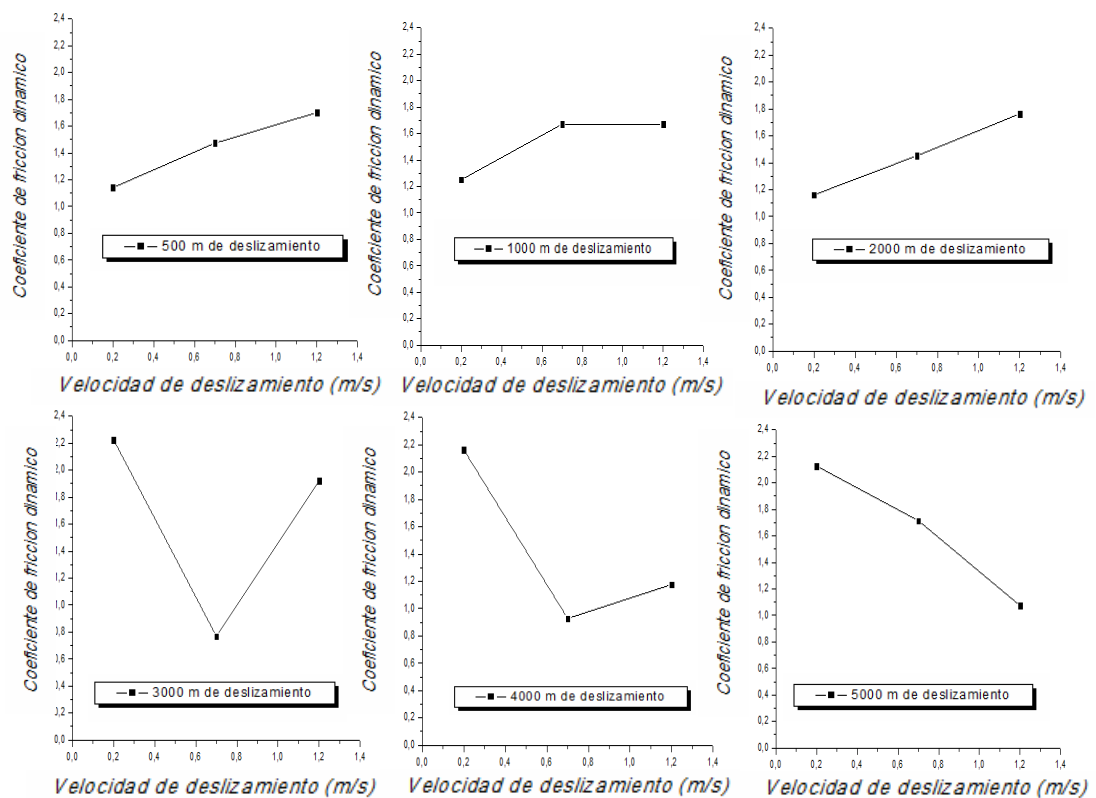
Estos valores corresponden a un desgaste medio. De 3000 a 4000 m, el coeficiente de fricción  $\mu_k$  es de 0,93 mientras que la tasa normalizada de desgaste se mantiene constante. Al igual que el volumen desgastado, la transición no se mantiene durante los últimos 1000 m y el coeficiente de fricción vuelve a aumentar hasta el valor de 1,71 mientras que la tasa normalizada de desgaste sube a  $8,84 \cdot 10^{-4}$ . Durante los últimos 600 m, se han observado oscilaciones del coeficiente de fricción lo que se traduce en un aumento del volumen desgastado y de la tasa normalizada de desgaste tal y como ha ocurrido en los ensayos a la velocidad de 0,2 m/s.



**Figura 3.10:** Evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia recorrida para la velocidad de 1,2 m/s



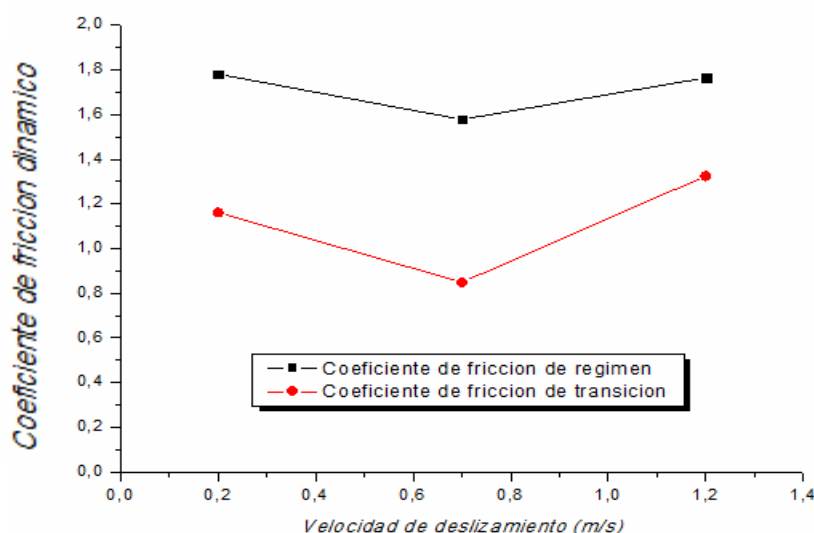
En el diagrama de cinética de desgaste a la velocidad de 1,2 m/s, se observa una zona de transición a partir de la distancia de 3000 m tal y como se observa en la figura 3.10. Esta figura presenta pocas variaciones del coeficiente de fricción hasta los 3000 m de recorrido. El promedio del coeficiente de fricción en este intervalo de distancia es de 1,8 y la tasa normalizada de desgaste es de  $5,88 \cdot 10^{-4}$ . Estos valores reflejan que el desgaste es “severo” durante los primeros 3000 m. Durante los últimos 2000 m, el coeficiente de fricción disminuye hasta el valor medio de 1,20 y la tasa normalizada de desgaste baja hasta  $0,94 \cdot 10^{-4}$ . Al igual que para el volumen desgastado, el coeficiente de fricción presenta una zona de transición. Hay que destacar que las oscilaciones observadas en las otras dos velocidades no han ocurrido para la velocidad de 1,2 m/s. Esta ausencia de oscilaciones puede explicar porque el volumen de desgaste es menor a esta velocidad.



**Figura 3.11:** Evolución para varias recorridos del coeficiente de fricción en función de la distancia recorrida para la velocidad de 1,2 m/s



Al comparar el coeficiente de fricción medio en función de la velocidad para una misma distancia recorrida (Figura 3.11), se observa como durante los primeros 2000 m, no se observa la presencia de la zona de transición y por tanto, el coeficiente de fricción aumenta al aumentar la velocidad de deslizamiento. Por el contrario, para 3000 m de recorrido, el coeficiente de fricción para la velocidad de 0,7 m/s disminuye desde 1,4 hasta 0,7. Este mismo comportamiento se presenta a los 4000 m de recorrido para las velocidades de deslizamiento de 0,7 y 1,2 m/s. Sin embargo, en los 5000 m de recorrido se observa como el coeficiente de fricción aumenta para la velocidad de deslizamiento de 0,7 m/s y se mantiene prácticamente constante para 1,2 m/s. La figura 3.12 muestra los coeficientes de fricción de régimen y de transición. Se puede notar que los coeficientes de fricción de transición son más bajos que los de régimen lo que confirma la presencia de la zona de transición del comportamiento al desgaste del acero inoxidable dúplex 2205.

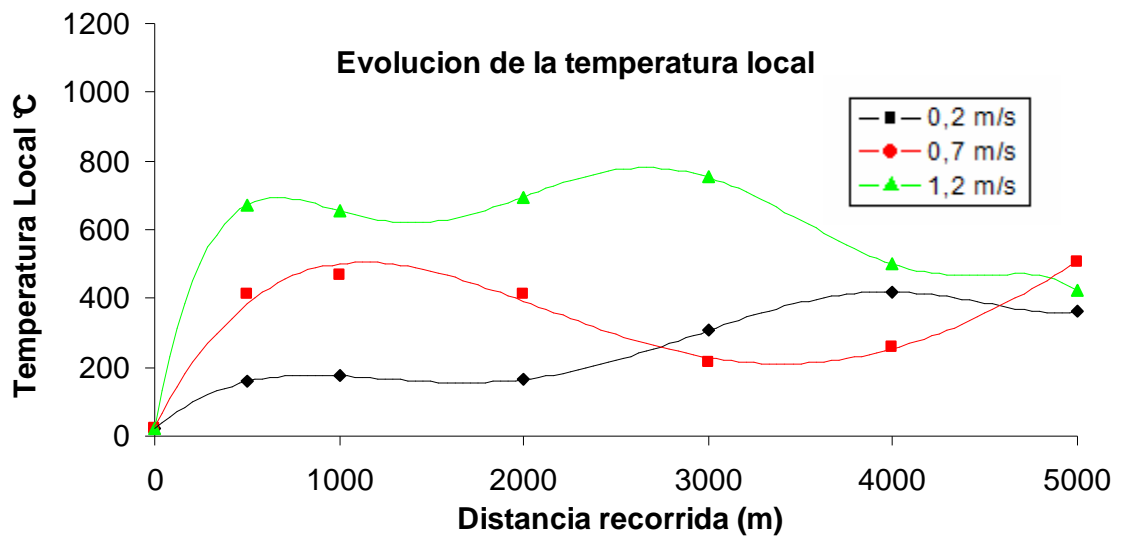


**Figura 3.12:** Evolución de los coeficientes de fricción de régimen y de transición en función de la distancia recorrida para la velocidad de 1,2 m/s

Como se ha explicado antes en el capítulo 2, la fricción genera un aumento de la temperatura local en la superficie de contacto. Se ha calculado el número de Peclet para cada velocidad de deslizamiento. El número de Peclet es de 11 para la velocidad de 0,2 m/s, 38,6 para 0,7 m/s y 66,2 para 1,2 m/s. Estos valores permiten determinar la ecuación que se ha de utilizar para calcular teóricamente la temperatura máxima local en el punto de contacto entre las superficies a lo largo del recorrido.







**Figura 3.13:** Evolución de la temperatura máxima local a lo largo del recorrido

La figura 3.13 presenta la evolución de la temperatura máxima local alcanzada a lo largo del recorrido. Se observa que la velocidad de deslizamiento influye sobre el aumento de temperatura por fricción. Al aumentar la velocidad de deslizamiento, la temperatura local aumenta. A 0,2 m/s la temperatura aumenta hasta 165°C y se mantiene prácticamente constante hasta los 2000 m. A partir de esta distancia recorrida, la temperatura sigue aumentando hasta valores comprendidas entre 300 y 450°C. A 0,7 m/s la temperatura aumenta hasta 400°C y se mantiene prácticamente igual al durante los primeros 2000 m. A partir de 3000 m, la temperatura baja hasta 215°C y se mantiene hasta los 4000 m, distancia en la cual la temperatura vuelve a aumentar hasta 500°C. A 1,2 m/s la temperatura aumenta hasta 670°C durante los primeros 1000 m y se mantiene a una temperatura comprendida entre 650 y 750°C hasta los 3000 m. A partir de 3000 m, la temperatura baja hasta 420°C. Para 0,7 m/s y 1,2 m/s, tal y como se ha observado para el volumen de desgaste, la evolución de la temperatura pone de manifiesto una zona de transición en la cual la temperatura disminuye. A 0,2 y 0,7 m/s la distancia de fin de la zona de transición de la evolución de la temperatura concuerda con la distancia de fin de la zona de transición del volumen desgastado.

Al evaluar la fuerza de fricción en función de la velocidad de deslizamiento y la distancia recorrida (Figura 3.14), se encuentra que existen zonas en las cuales se producen variaciones de la fuerza de fricción. A la velocidad de 1,2 m/s, no ocurren las oscilaciones



de la fuerza de fricción y, lo que se observa es una disminución de la fuerza de fricción. En cuanto a los ensayos a 0,2 y 0,7 m/s, la aparición de las oscilaciones concuerda con la distancia de fin de la zona de transición. La presencia de estas oscilaciones origina el aumento del coeficiente de fricción, la fuerza de fricción pero sobre todo un aumento de la tasa normalizada de desgaste.

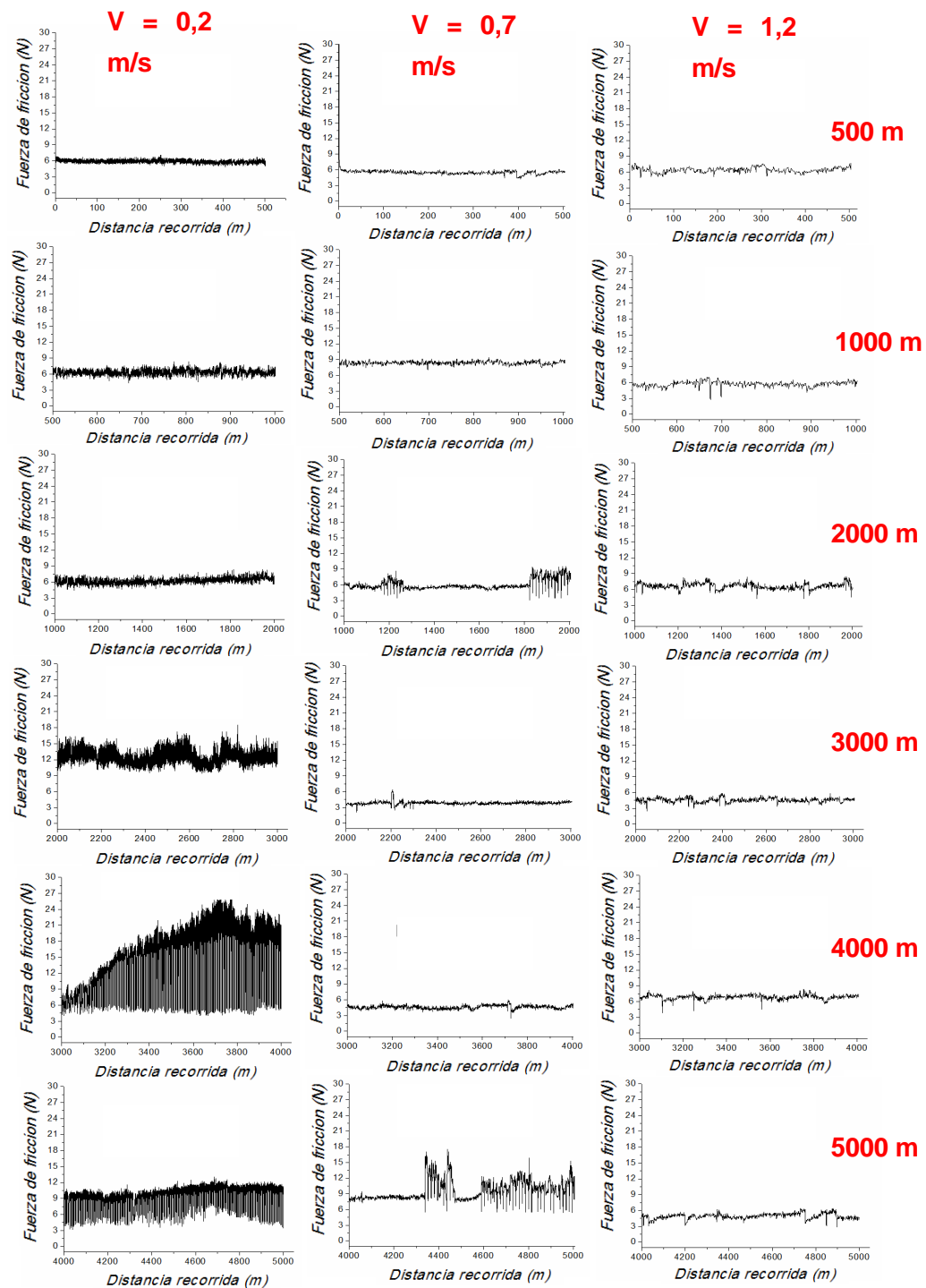
Por esta razón, se han revisado estas oscilaciones. En la figura 3.15, se muestran en detalle las oscilaciones de la fuerza de fricción encontradas para las velocidades de 0,2, 0,7 y 1,2 m/s. Como se observa en la figura, al aumentar la velocidad de deslizamiento, las oscilaciones desaparecen. A la velocidad de 0,2 m/s, las oscilaciones son muy frecuentes. A 0,7 m/s, las oscilaciones son más espaciadas que a la velocidad de 0,2 m/s.

Estas oscilaciones pueden ser causadas por la acción en común del aumento de la carga y de la fuerza de fricción. Como se puede observar en la figura 3.14, las oscilaciones se componen de periodos cíclicos de caída de la fuerza de fricción. La caída de la fuerza de fricción, asociada a una caída de la carga nominal, induce un deslizamiento súbito caracterizado por una secuencia de series de saltos que provocan una pista de desgaste no uniforme.

Así por ejemplo, a 0,2 m/s y a una distancia recorrida comprendida entre 4950 y 4970 m, se puede observar que la fuerza de fricción disminuye de manera súbita cada 4 metros mientras que a 0,7 m/s entre 4930 y 5000 m esta caída ocurre cada 14 metros.

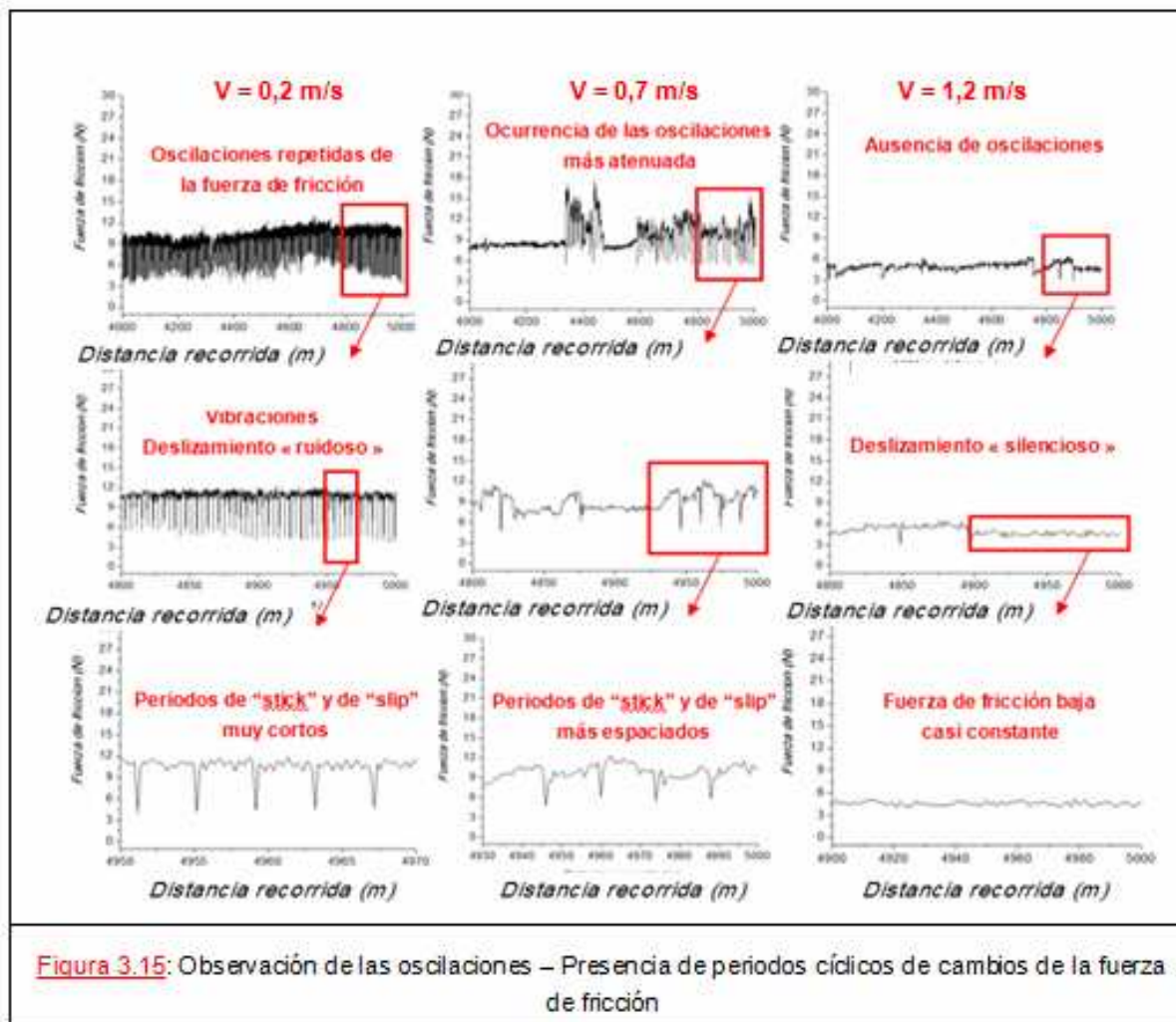
Estos periodos cíclicos de cambio súbito de la fuerza de fricción se deben a un mecanismo que se le conoce como “stick-slip”. Este mecanismo está asociado directamente a la rigidez del sistema de contacto entre las dos superficies. Si el sistema es poco rígido (como es el caso del tribómetro utilizado para realizar los ensayos) y, la fricción generada origina un aumento de la frecuencia de vibración de dicho sistema entra en una fase de resonancia que hace que aparezca este mecanismo. Sin embargo, a pesar de que las oscilaciones ocurran exactamente a las distancias de la tasa normalizada de desgaste “severo”, no se puede asegurar que el aumento de dicha tasa se deba al mecanismo descrito anteriormente.





**Figura 3.14:** Evolución de la fuerza de fricción para cada velocidad de deslizamiento





### 3.5.3. Mecanismos de desgaste y análisis de la superficie desgastada

La observación tanto óptica como microscópica de las superficies desgastadas permite determinar los mecanismos de desgaste. En primer lugar, después de cada ensayo, se ha utilizado el microscopio óptico para observar la superficie desgastada y medir el ancho de la pista de desgaste. En la figura 3.16 se muestran estas superficies para cada velocidad y diferentes distancias de recorrido. Para cada distancia recorrida, la pista presenta diferentes zonas. En el medio de la pista, se observa una zona clara que corresponde al centro de la pista mientras que las zonas más oscuras corresponden a regiones de material transferido desde el centro de la pista. Además, hay que destacar que estas zonas de color y de rugosidad diferentes evolucionan a lo largo del recorrido. En todas las superficies analizadas, la zona central presenta grietas y zonas de deformación plástica que son características de los desgastes por abrasión y por adhesión.



Durante los ensayos a 0,2 m/s, después de 500 m, la zona central tiene un ancho de 0,2 mm y se puede observar la presencia de óxidos, caracterizados por un color marrón a nivel de la superficie central. A la distancia de 1000 m de deslizamiento, esta zona central tiene un ancho de 0,7 mm, lo que se traduce en una disminución de la tasa normalizada de desgaste. Luego, el ancho de la zona central sigue evolucionando hasta la distancia de 5000 m de deslizamiento. En esta zona, y particularmente a partir de 3000 m, se puede observar la presencia de grietas y de zonas de deformación plástica. Para las otras dos velocidades de deslizamiento, el comportamiento es similar. Una particularidad que hay que destacar es que hay una correlación entre la tasa normalizada de desgaste y la proporción de cada zona. En efecto, una superficie que presenta, por ejemplo, 80% de zonas claras y 20% de zonas oscuras tiene una tasa de desgaste “severa” mientras que una proporción de 20% de zonas claras y 80% de zonas oscuras corresponde a una tasa de desgaste “media”. Sí se toma en cuenta la evolución de las superficies de desgaste para la velocidad de 1,2 m/s, se observa la importancia de las zonas más oscuras. Durante los primeros 1000 m, caracterizados por una tasa de desgaste “severa”, la zona central ocupa la mitad de la pista. Entre 1000 y 2000 m, esta zona central disminuye y nuevamente aumenta al cabo de 3000 m. Los últimos 2000 m se caracterizan por una proporción mayoritaria de zonas oscuras y una superficie que tiene una apariencia muy lisa.





La observación microscópica de la sección transversal de las probetas después de los ensayos de “pin-on-disk” ofrece también información de la evolución del desgaste. La figura 3.20 representa esta evolución para las tres velocidades estudiadas. Se puede ver que la pista de desgaste evoluciona no sólo a nivel del ancho que aumenta sino también a nivel de la profundidad de desgaste. La profundidad de desgaste aumenta con la distancia de deslizamiento. La obtención de los perfiles de rugosidad nos puede ayudar a determinar esta profundidad para cada distancia y velocidad de deslizamiento.

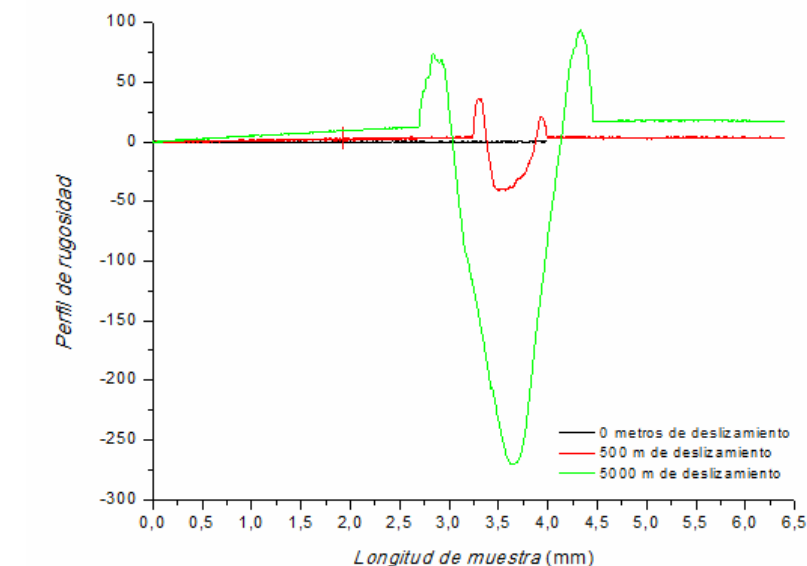




La figura 3.17 presenta la evolución de los perfiles de rugosidad antes del deslizamiento, a 500 m y a 5000 m de deslizamiento para una velocidad de deslizamiento de 0,7 m/s. Para cada velocidad, la profundidad de desgaste aumenta a lo largo del recorrido. En la figura 3.18, se puede apreciar la profundidad de desgaste al cabo de 5000 m a una velocidad de 0,2 m/s que vale 275  $\mu\text{m}$ . El análisis de las otras velocidades nos da una evolución a lo largo del deslizamiento idéntica. A 0,7 y 1,2 m/s, se ha podido calcular una profundidad de desgaste respectivamente de 220  $\mu\text{m}$  y 180  $\mu\text{m}$  después de una distancia de 5000 m.

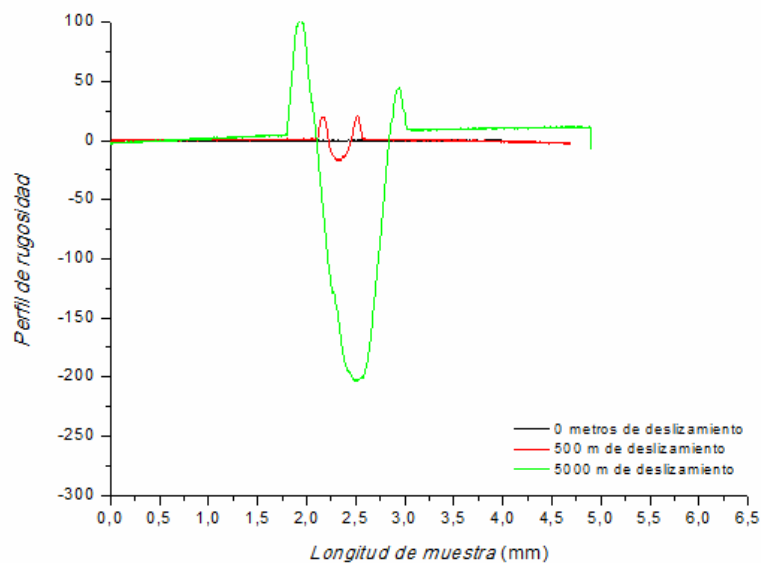
La observación de la sección transversal de los discos permite comprobar la presencia del mecanismo de desgaste denominado “Ploughing”. El “Ploughing” es producido por el desplazamiento de material hacia el exterior de la pista como se puede ver en la figura 3.17. Este mecanismo no produce una pérdida de material por lo que se puede asegurar que existen otros mecanismos que inducen la pérdida de material tal y como se ha visto anteriormente. Además, hay que resaltar que este desplazamiento de material hacia el exterior es el que induce la formación de las zonas oscuras descritas anteriormente.

Otro mecanismo de desgaste que se observa en la figura 3.20 es el debido a la deformación plástica a nivel superficial. En la sección transversal, gracias al ataque químico, se puede observar la deformación plástica de los granos de austenita y de ferrita cerca de la superficie.

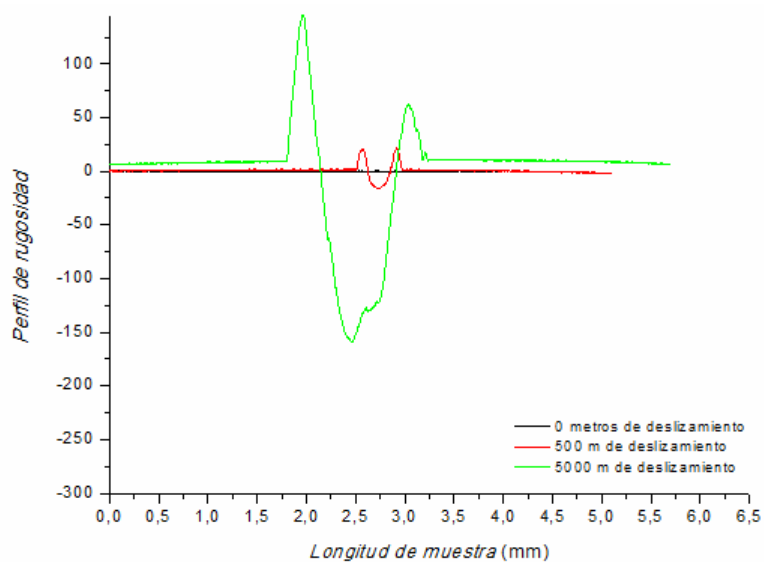


**Figura 3.17:** Observación del perfil de rugosidad para diferentes recorridos a la velocidad de 0,2 m/s





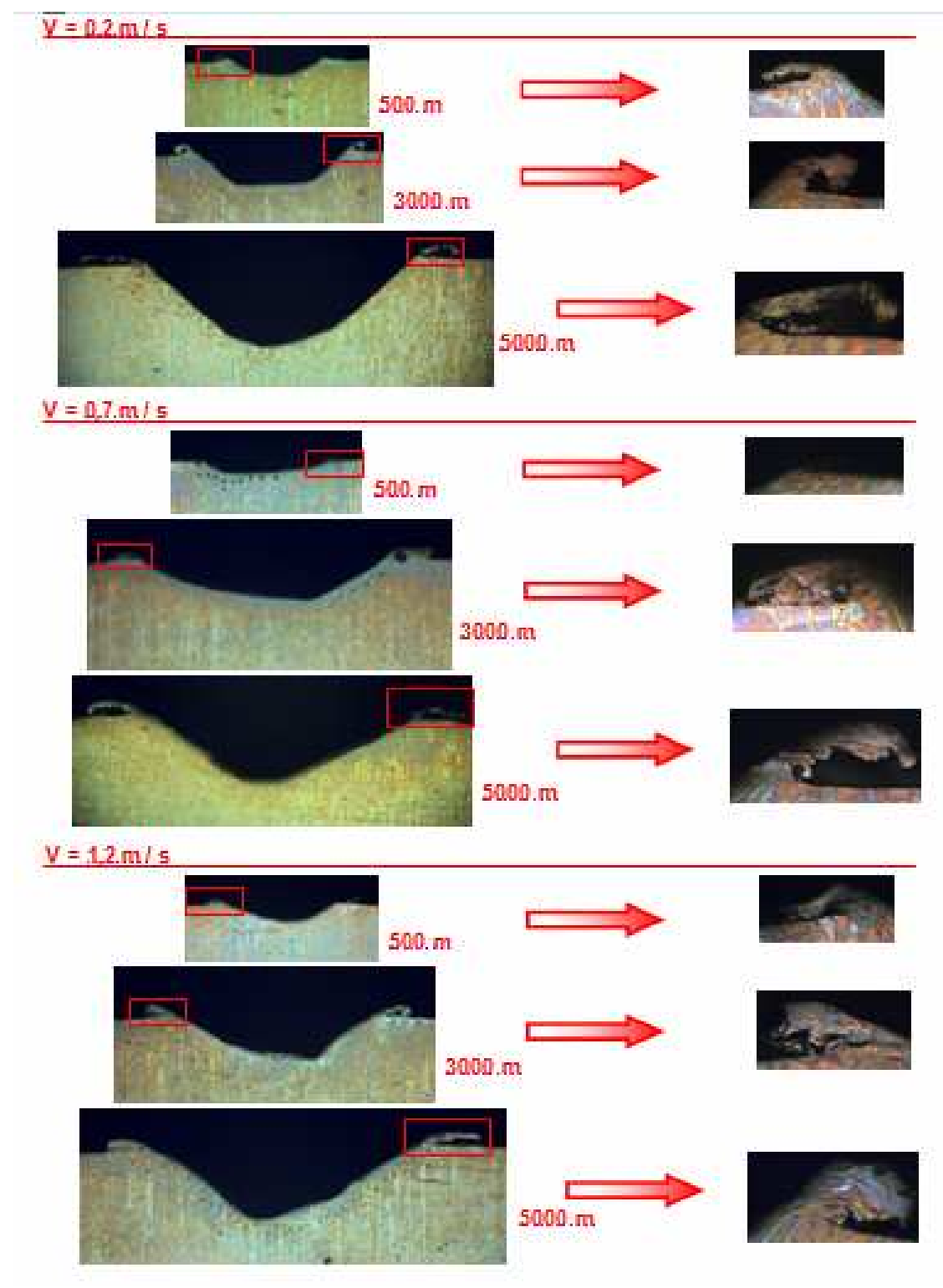
**Figura 3.18:** Observación del perfil de rugosidad para diferentes recorridos a la velocidad de 0,7 m/s



**Figura 3.19:** Observación del perfil de rugosidad para diferentes recorridos a la velocidad de 1,2 m/s







**Figura 3.20:** Sección transversal de los discos de acero inoxidable dúplex 2205. Observación de la evolución de la pista de desgaste para diferentes velocidades y manifestación del mecanismo de “Ploughing”



Mediante la observación al MEB, se puede también analizar la evolución del desgaste a lo largo del deslizamiento del acero inoxidable dúplex 2205. Se han comparado las superficies desgastadas a diferentes distancias de deslizamiento para las tres velocidades.

A la velocidad de 0,2 m/s (Figura 3.17), se puede apreciar la evolución del mecanismo de “Ploughing” a lo largo del recorrido. Al observar las superficies desgastadas, se pueden identificar varias características significativas de los tipos y mecanismos de desgaste. Después de una distancia de deslizamiento de 500 m, se ven grietas y zonas de deformación plástica que producen partículas de desgaste. Estas características ponen de manifiesto la presencia de los desgastes por abrasión y por fatiga. A la distancia de 3000 m, se puede observar un agrietamiento con propagación de las grietas. Esto es significativo de un desgaste por fatiga y puede provocar la formación de partículas de desgaste. A 5000 m, la superficie comprende muchas zonas agrietadas por lo que se puede deducir que el mecanismo de desgaste dominante es por fatiga a esta distancia de deslizamiento.

A la velocidad de 0,7 m/s (Figura 3.18), las superficies observadas presentan el mismo tipo de características. A 500 m, se nota una zona de estriaciones que indica la presencia de una deformación por cizalla. La abrasión puede ser una causa de tal deformación. Además, se observa también el mecanismo de “Ploughing”. A 3000 m, se puede observar la evolución del “Ploughing”, que sigue aumentando, y la presencia de grietas. A 5000 m, se pueden ver las mismas características. A esta velocidad, al igual que para la velocidad de 0,2 m/s, se observan los desgastes por abrasión y por fatiga. Las grietas, la deformación plástica y el “Ploughing” son típicos de estos tipos de desgaste.

Los 500 primeros metros a la velocidad de deslizamiento de 1,2 m/s (Figura 3.19) generan un estado de superficie igual a las superficies obtenidas a las dos velocidades más bajas, con la presencia de microgrietas. A 3000 y 5000 m, la superficie parece muy lisa y pone de manifiesto zonas de estriaciones importantes. Los mismos mecanismos que para las velocidades de 0,2 y 0,7 m/s intervienen.

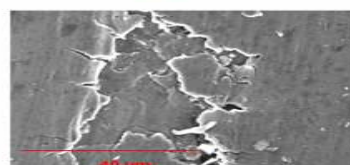
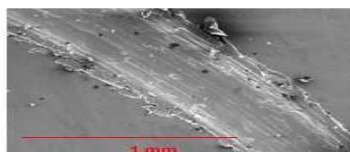
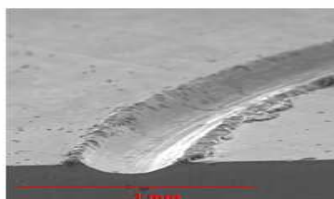
La observación al MEB indica algunos mecanismos de desgaste. Esto prueba que diferentes mecanismos de desgaste pueden coexistir e interactuar. Las variaciones de las condiciones de contacto pueden producir la coexistencia de los diferentes mecanismos detectados. Determinar la coexistencia de los mecanismos y conocer el mecanismo dominante no es fácil ya que el deslizamiento provoca el debilitamiento del material por deformación repetida, asociada a pérdida por fractura y/o abrasión.

La observación de los diagramas de cinética de desgaste demuestran la presencia de una transición del comportamiento al desgaste del acero inoxidable dúplex 2205 pero la identificación de los mecanismos de desgaste no nos permite explicar esta transición.



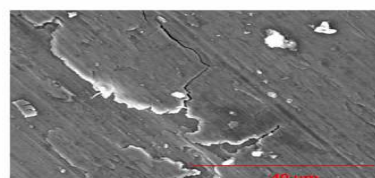
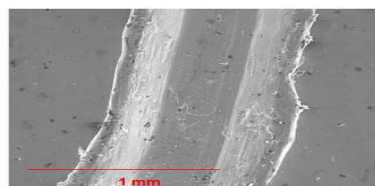
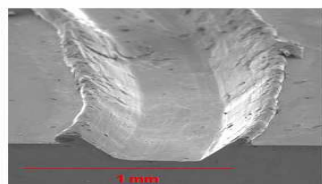
---

**V = 0,2 m / s 500 m**



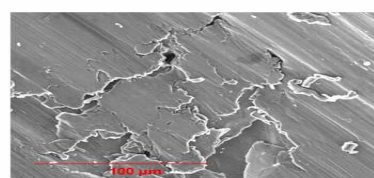
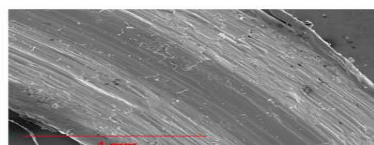
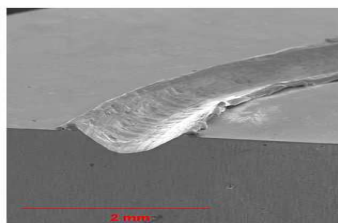
---

**V = 0,2 m / s 3000 m**



---

**V = 0,2 m / s 5000 m**



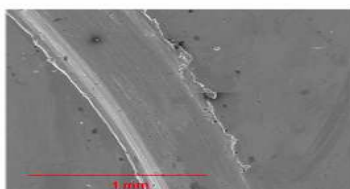
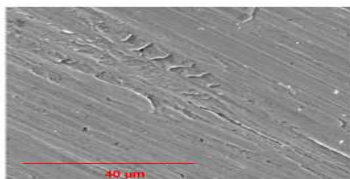
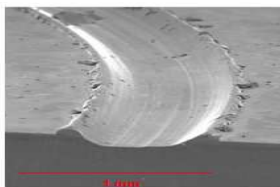
---

**Figura 3.21:** Observación al MEB de las superficies de desgaste a la velocidad de deslizamiento de 0,2 m/s para varios recorridos



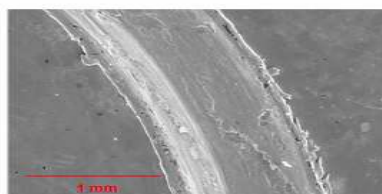
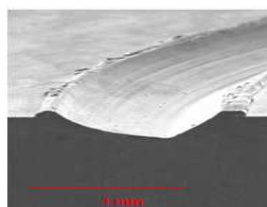
---

**V = 0,7 m / s 500 m**



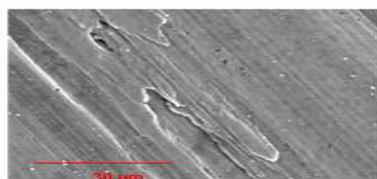
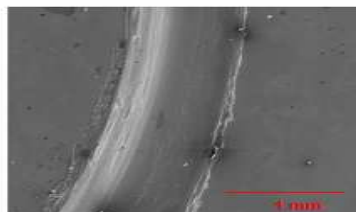
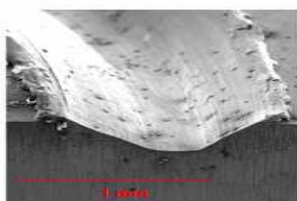
---

**V = 0,7 m / s 3000 m**



---

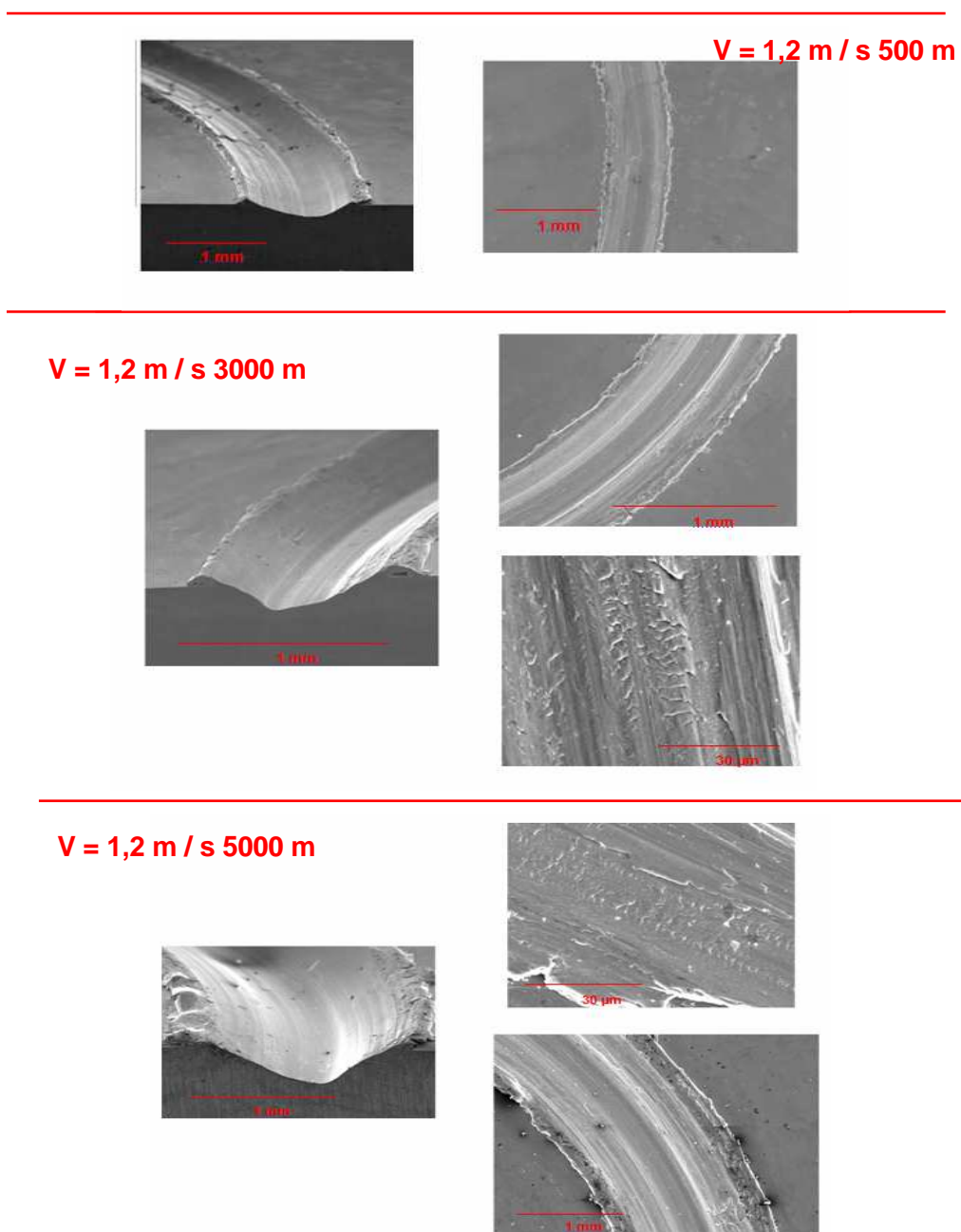
**V = 0,7 m / s 5000 m**



---

**Figura 3.22:** Observación al MEB de las superficies de desgaste a la velocidad de deslizamiento de 0,7 m/s para varios recorridos





**Figura 3.23:** Observación al MEB de las superficies de desgaste a la velocidad de deslizamiento de 1,2 m/s para varios recorridos



El MEB tiene la particularidad de detectar los electrones secundarios y retrodifusados y analizarlos para determinar la composición química del material. Tomando en cuenta esta posibilidad, se ha analizado la composición química de la superficie de desgaste. La tabla 3.4 presenta las proporciones de óxidos que se han encontrado en las superficies de desgaste analizadas. Este examen es más cualitativo que cuantitativo pero nos da una idea de la presencia o no de óxidos en las superficies desgastadas.

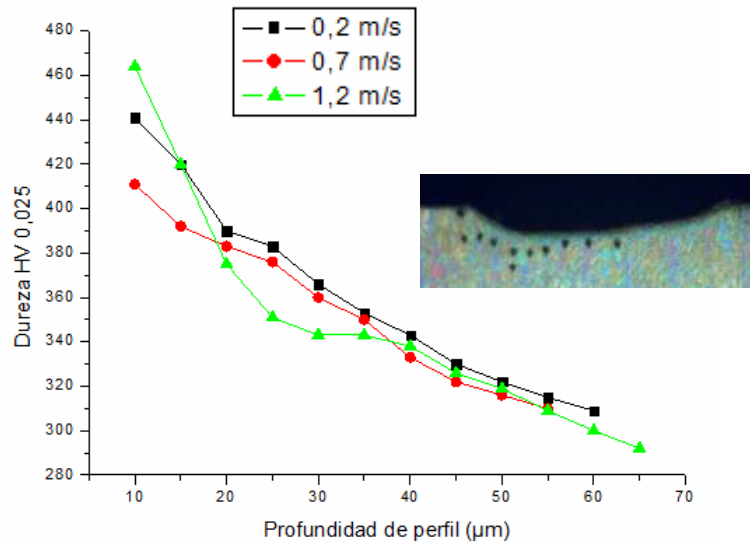
Proporcion de oxidos presentes en la supeficie de desgaste	0,2 m / s	0,7 m / s	1,2 m / s
500 m	0%	$3 \pm 0,43 \%$	$3,71 \pm 0,65 \%$
3000 m	$5 \pm 0,45 \%$	$3,08 \pm 0,78 \%$	$5,08 \pm 0,98 \%$
5000 m	$6 \pm 0,75 \%$	$6,25 \pm 1,12 \%$	$7,16 \pm 1,21 \%$

**Tabla 3.4:** Proporciones de oxidos presentes en las superficies de desgaste

A 0,2 m/s, se puede ver que no hay óxidos al cabo de 500 m de deslizamiento mientras que una cantidad de óxidos aparece al aumentar la distancia recorrida. A 0,7 y 1,2 m/s, se ha observado una cantidad débil de óxidos al cabo de 500 m. Esta proporción de óxidos sigue aumentando a lo largo del recorrido lo que puede explicar la transición del comportamiento al desgaste. Cabe también destacar que la proporción de óxidos encontrada aumenta con la velocidad de deslizamiento.

Como se ha visto antes, la deformación plástica se puede reconocer por la orientación de los granos. La evolución de la superficie de desgaste pone de manifiesto que la deformación plástica aumenta con la distancia y la velocidad de deslizamiento. En la figura 3.24, se presentan los perfiles de microdureza a lo largo de la pista de desgaste. Se observa que la deformación plástica produce un endurecimiento del disco a nivel de la pista. Para un mismo recorrido, la velocidad de deslizamiento influye produciendo un ablandamiento a nivel del contacto. Se ve además que al aumentar la profundidad la microdureza Vickers HV 0,025 disminuye.





**Figura 3.24:** Evolución de la deformación plástica por debajo de la superficie para una distancia de deslizamiento de 500 m

Las observaciones presentadas indican que, para cada velocidad de deslizamiento, el desgaste de régimen es debido a una delaminación de la superficie mientras que la presencia de óxidos en las superficies desgastadas nos indica la presencia de una oxidación de la superficie que disminuye la tasa de desgaste.

En cada velocidad de deslizamiento estudiada, se ha observado una deformación plástica importante. Esta deformación se caracteriza por un desplazamiento del material hacia el exterior de la pista. Estas zonas dichas oscuras procuran un medio favorable a la formación de los óxidos. La seguida del deslizamiento puede llegar a la formación de una capa protectora de óxidos. Esta capa de óxidos muy frágil se puede romper y generar viruta que contiene óxidos y pues generar un desgaste por tribo-oxidación.

A las tres velocidades de deslizamiento, se ha observado una primera etapa de desgaste “severo” seguida por una etapa de desgaste “medio”. Durante el desgaste “severo”, se puede asimilar que la tasa de desgaste se debe a la pérdida de partículas metálicas por abrasión entre las rugosidades en contacto. El desgaste “medio” puede ser debido a una oxidación de la superficie que permite disminuir la fricción durante el deslizamiento.

Las transiciones del comportamiento al desgaste dependen de la velocidad y de la distancia de deslizamiento. A las velocidades estudiadas, la transición se traduce por una



disminución de la tasa de desgaste asociada a un cambio de los mecanismos de desgaste. Como se ha visto antes, la distancia de deslizamiento de transición aumenta con la velocidad de deslizamiento.

Diferentes procesos influyen en la distancia de transición. El primero es asociado al ablandamiento de la superficie por efecto térmico. Un proceso asociado al aumento de la temperatura es la formación de una capa de óxidos que puede resistir al desgaste y disminuirlo. El crecimiento del óxido es lineal con el tiempo y depende del potencial de Oxígeno [13]. Esto explica la influencia de la velocidad de deslizamiento sobre la distancia en la cual aparece la zona de transición. Para un mismo tiempo de deslizamiento, la distancia recorrida es seis veces mayor a una velocidad de 1,2 m/s como a 0,2 m/s. Al aumentar el potencial del Oxígeno, un aumento de temperatura favorece el crecimiento de la capa de óxidos hasta un valor crítico que permite una buena cohesión entre la capa y el sustrato.

Para entender el efecto de la velocidad de deslizamiento, hay que saber que las características de la superficie deformada por cizalla cambian, es decir que la deformación plástica es más importante en el caso de una velocidad de deslizamiento más alta. Al aumentar la velocidad de deslizamiento, la deformación plástica es más importante y la capa de óxidos que se forma es mayor. Esto puede explicar porque la transición dura hasta 5000 m a la velocidad más alta. Otro parámetro que se tiene que tomar en cuenta para explicar el fin de la transición a las velocidades de 0,2 y 0,7 m/s es la presencia del mecanismo de “stick-slip”.





## 4. Conclusiones

El estudio efectuado sobre el comportamiento tribológico del acero inoxidable dúplex 2205 ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- ✚ La velocidad de deslizamiento influye sobre la cinética del desgaste. Al aumentar la velocidad de deslizamiento, el volumen de desgaste disminuye.
- ✚ La cinética del desgaste presenta una zona de transición a lo largo del recorrido, cuya distancia aumenta con la velocidad de deslizamiento. En el caso de las velocidades de 0,2 y 0,7 m/s, esta zona desaparece a partir de una distancia de 2000 y 4000 m respectivamente, mientras que para la velocidad de 1,2 m/s, la zona de transición se mantiene hasta los 5000 m de distancia recorrida.
- ✚ La tasa de desgaste en la zona de transición es de 4 a 5 veces menor que la tasa de desgaste en la zona de régimen. Estas zonas se caracterizan por presentar un desgaste “medio” y “severo” respectivamente. El coeficiente de fricción presenta también una zona de transición que se corresponde con la zona de transición del comportamiento en los diagramas de la cinética del desgaste.
- ✚ Al aumentar la velocidad de deslizamiento, la capa de óxidos formada en la superficie de contacto es más estable. Esto se traduce en un aumento de la zona de transición. Sin embargo, para las velocidades de 0,2 y 0,7 m/s, la capa que se forma es eliminada por el desgaste por abrasión. Para las velocidades de 0,2 y 0,7 m/s, el fin de la zona de transición se corresponde con la presencia de oscilaciones de la fuerza de fricción. Estas oscilaciones son producidas por el mecanismo de “stick-slip”.
- ✚ Al aumentar la velocidad de deslizamiento, se observa un aumento de la temperatura local máxima en la superficie de contacto.
- ✚ Los mecanismos de desgaste observados son los desgastes por abrasión, por fatiga y por oxidación. El desgaste por abrasión se ha caracterizado por el “ploughing” y el corte que originan la deformación plástica de la superficie desgastada. La observación de microgrietas nos informa de la presencia del desgaste por fatiga mientras que la presencia de óxidos en la superficie desgastada y en la viruta muestran la aparición del desgaste por oxidación.



En la zona de régimen, los desgastes por abrasión y por fatiga interactúan mientras que en la zona de transición, el desgaste por oxidación reduce la tasa de desgaste debida a la interacción de los desgastes por abrasión y por fatiga.



## 5. Agradecimientos

Deseo expresar mi sincero agradecimiento al Dr. Marc ANGLADA, director del grupo de investigación de Fractura y Fatiga, por permitirme realizar mi proyecto de fin de carrera dentro del grupo de investigación.

También quiero agradecer el apoyo de mi tutor, el Dr. Antonio MATEO, que me ha guiado en la realización de este proyecto.

Agradezco también al Dr. Alvaro MESTRA y a la Dra. Gemma FARGAS por su valiosa ayuda para la realización de este trabajo.

Mis agradecimientos van igualmente a Francesc HEREDERO por su disponibilidad durante las diferentes fases del proyecto.








## 6. Costes e impacto medioambiental

### 6.1. Costes




El presente estudio se basa en el trabajo de 6 meses bajo la asesoría de un profesor y dos técnicos investigadores. Se ha desarrollado en el Laboratorio de Fractura y Fatiga de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona (ETSEIB) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Para su realización, se han utilizado diferentes máquinas y equipos disponibles en el citado laboratorio.

Las tareas básicas de este trabajo han sido:

-  Revisión del estado del arte del trabajo a realizar.
-  Preparación metalográfica del material de estudio.
-  Observación y medición de las probetas mediante diferentes técnicas de microscopia.
-  Realización de los ensayos tribológicos.
-  Interpretación y análisis de los resultados.

En base a lo expuesto anteriormente, el coste de este proyecto se estructura según tres conceptos base: la amortización de las máquinas utilizadas, el gasto asociado al material de laboratorio necesario para todas las tareas y los honorarios del personal involucrado en la realización del proyecto.

En referencia al personal especializado se ha estimado en tiempos su participación:

-  La intervención del profesor en forma de reuniones de seguimiento ha sido de aproximadamente de 3 hora al mes. A nivel de honorarios se le considera como Ingeniero Jefe del Proyecto.
-  La intervención del técnico investigador asesor se estima en aproximadamente de 20 horas al mes. A nivel de honorarios se le considera como Ingeniero Senior.
-  El trabajo realizado por el autor del presente proyecto se estima en aproximadamente 120 horas. Los honorarios serán calculados en base a un Ingeniero sin experiencia.



- ✚ La utilización de todos de los instrumentos y máquinas de ensayo necesitan el soporte de personal técnico del laboratorio. Por tanto, su asesoría es necesaria para comprobar el uso correcto de las diferentes máquinas y equipos del laboratorio. Se estima la intervención de los técnicos de laboratorio en 1 hora al mes.

A continuación se presenta en la siguiente tabla el coste de cada uno de los conceptos que intervienen en el proyecto y los tiempos asociados a cada uno de ellos.






Concepto	Coste unitario	Cantidad	Subtotal
<b>Costes de amortización de la maquinaria</b>			
Pulidoras manuales ECOMET-4 de BUEHLER	10 €/h	100 h	1 000 €
Maquina de corte ACCUTOM-2 de STRUERS	10 €/h	4 h	40 €
Tribómetro TRM-1000 de WAZAU	40 €/h	100 h	4 000 €
Maquina de ensayos FRANK 532	10 €/h	1 h	10 €
Microscopía óptica	20 €/h	30 h	600 €
Microscopía electrónica de barrido (MEB)	50 €/h	4 h	200 €
Perfilometría	40 €/h	30 h	1 000 €
SUBTOTAL			6850 €
<b>Material de laboratorio</b>			
Paño gruesos para la preparación metalográfica	1 €/ud.	4	4 €
Paño de tiercopelo para la preparación metalográfica (6 µm y 1 µm)	70 €/ud.	2	140 €
Pasta de Alúmina (6 µm y 1 µm)	110 €/450 g	45 g	11 €
Disco de corte de diamante	640 €/ud.	0,1	64 €
Sosa cáustica a 15 % para el ataque químico	2 €/L	100 mL	0,2 €
Disco de acero inoxidable dúplex 2205	3 €/ud.	25	75 €
Pin de metal duro GD03	3 €/ud.	5	15 €
SUBTOTAL			310 €
<b>Honorarios personal especializado (periodo: 6 meses)</b>			
Ingeniero Junior	12 €/h	800 h	9 600 €
Ingeniero Senior	30 €/h	120 h	3 600 €
Jefe de proyecto	60 €/h	18 h	1 080 €
Técnicos de laboratorio	25 €/h	6 h	150 €
SUBTOTAL			14430 €
<b>TOTAL PROYECTO</b>			<b>21990 €</b>

**Tabla 6.1:** Costes del proyecto de investigación



## 6.2. Impacto medioambiental

Como ya se ha descrito en el apartado anterior el desarrollo del presente proyecto comporta las siguientes actividades:

-  Revisión del estado del arte del trabajo a realizar.
-  Preparación metalográfica del material de estudio.
-  Observación y medición de las probetas mediante diferentes técnicas de microscopía.
-  Realización de los ensayos tribológicos.
-  Interpretación y análisis de los resultados.

En este contexto la valoración del impacto ambiental asociado a esta investigación se limitará al consumo de energía vinculado a la utilización de las diferentes máquinas de preparación y ensayo, a los materiales de las probetas y al tratamiento de los residuos derivados del uso del material de laboratorio necesario para la preparación de las muestras a analizar.

Es necesario indicar que el laboratorio está instalado en un sótano lo que provoca la utilización ininterrumpida de energía para iluminar las instalaciones. El consumo de energía asociado al uso de las máquinas se optimizó mediante planificación para reducir al máximo los procedimientos y ensayos suplementarios o innecesarios. Sin embargo los ensayos de “pin-on-disk” requieren muchas horas de funcionamiento y por consiguiente un gran consumo de energía.

Las probetas que han sido utilizadas para la realización de los ensayos han sido un número muy reducido. Así mismo, una de las ventajas de la tribología es la de poder utilizar los dos lados de las probetas en la experimentación. Esto se traduce en un ahorro de material.

Las operaciones de preparación metalográfica de las muestras requieren varios pasos, utilizando máquinas de pulido y diferentes accesorios. Con el fin de obtener el acabado deseado se emplean diferentes paños de pulido, lubricantes y pasta de Alúmina de calidades cada vez más finas. Tras la utilización de cada paño, estos son limpiados con agua. Las aguas sucias de pulido con partículas residuales de la probeta, pasta de Alúmina y lubricante, se filtran mediante tamices.



Para la observación de las probetas se realizaron en ciertos casos procesos de corte. Para evitar el calentamiento de los discos de corte, las máquinas disponen de lubricación. Una vez retirados estos lubricantes se vierten sobre recipientes destinados a tal efecto, de manera que no se mezclen con otras sustancias y puedan ser objeto del tratamiento adecuado.

Para la limpieza de las diferentes probetas, se utilizan productos químicos como acetona y etanol que después de su uso, se introducen en unos determinados envases para su posterior reciclaje.

Este proyecto ha permitido determinar los tipos de desgaste y los mecanismos presentes en el desgaste por deslizamiento en el acero inoxidable dúplex 2205. De esta forma, se intenta predecir el deterioro del material, lo que permitiría estimar hasta que punto puede ser utilizado sin que pierda su eficacia y el rendimiento por lo que su aplicación se ve optimizada. Esta optimización, permitiría un ahorro de energía y de material.



## 7. Referencias

- [1] Curtis W. Kovach, "High-Performance Stainless Steels", 1995.
- [2] Pierre-Jean Cunat, "Aciers inoxydables, critères et choix de structures" Techniques de l'ingénieur Doc. M 4 544.
- [3] G. Di Caprio, "Los aceros inoxidable: Martensíticos, ferríticos, austeníticos,...etc.", 1999.
- [4] ING. Sergio G. Laufgang, "Aceros inoxidable", 2003.
- [5] Albert Kozłowski, "Données numériques sur les aciers inoxydables" Techniques de l'ingénieur Form. M 323 – 1
- [6] ASM Metals Handbook, Volume 18 "Friction, Lubrication and Wear Technology", 1992.
- [7] Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor, "Engineering tribology", 2001.
- [8] ASTM International, "Standard test method for wear testing with Pin-on-Disk Apparatus", G 99 – 04, 2004.
- [9] Bharat Bhusham, Francis E. Kennedy, Andras Z. Szeri, Modern tribology handbook Volume 1, "Macrotribology", 2001.
- [10] K.C. Ludema, "Friction, Wear, Lubrication - A textbook in tribology", 1996.
- [11] A.F. Smith, "The sliding wear of 316 stainless steel in air in the temperature range 20-500 °C", 1985.
- [12] A.F. Smith, "The friction and sliding wear of unlubricated 316 stainless steel in air at room temperature in the load range 0,5-90 N", 1986.
- [13] A.F. Smith, "The influence of surface oxidation and sliding speed on the unlubricated wear of 316 stainless steel at low load", 1985.
- [14] M.C.M Farias, R.M. Souza, A. Sinatora, D.K. Tanaka, "The influence of applied load, sliding velocity and martensitic transformation on the unlubricated sliding wear of stainless steels", 2006.
- [15] G. Straffelini, D. Trabucco, A. Molinari, "Sliding wear of Austenitic and Austenitic-Ferritic Stainless Steels", 2006.





- [16] Y. Torres, “Comportamiento a fractura y fatiga de carburos cementados WC-Co”, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2002.
- [17] ASM Metals Handbook, Volume 9 “Metallography and microstructures”, 2004.
- [18] JIS B0601, “Methods of surface roughness analysis and display”, 2001.
- [19] Raymond G. Bayer, “Wear analysis for engineers”, 2002.

